



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**PŘEDCERTIFIKAČNÍ TESTY
ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI**

PRE-COMPLIANCE ELECTROMAGNETIC IMMUNITY TESTS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Václav Růžek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Disertační práce pojednává o aspektech předcertifikačních testů elektromagnetické odolnosti v automobilovém průmyslu. Práce analyzuje používanou zkušební metodiku a zmiňuje, že standardizované testy elektromagnetické odolnosti prováděné certifikovanými zkušebnami jsou finančně velmi nákladné a představují značnou časovou zátěž při vývoji vozidla. Práce proto navrhuje inovativní způsoby, jakými lze certifikační testy při přijatelné míře nejistoty nahradit. Jako klíčové se z hledisky úspory času jeví zejména metody založené na numerických simulacích dané problematiky a modifikovaných zkušebních procedurách při expozici vozidla elektromagnetickým polem. Jednotlivé navrhované metody jsou podrobně prozkoumány a jejich vypovídací schopnost podpořena řadou experimentů. Výsledky dosažené pomocí předcertifikačních metod jsou objektivně porovnány pomocí metody FSV s výsledky certifikačních měření. Práce tak přináší návrh ucelené zkušební metodiky včetně diskuze rizik a nejistot s touto problematikou spojených.

KLÍČOVÁ SLOVA

předcertifikační test, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická odolnost, numerická simulace, feature selective validation, vozidlo

ABSTRACT

The doctoral thesis deals with aspects of pre-certification tests of electromagnetic immunity in the automotive industry. The thesis analyses commonly used test methodology and mentions that standardized electromagnetic immunity tests performed by certified testing centres are extremely expensive and represents a considerable time load in the development of the vehicle. The thesis therefore proposes innovative ways for replacement of certification tests with an acceptable level of uncertainty. Key methods are seen in numerical simulations and modified test procedures when the vehicle is exposed by electromagnetic field. The proposed methods are deeply explored and their benefits are discussed and support by number of experiments. The results obtained with the pre-certification methods are objectively compared with the results of the certification measurements by FSV method. The work brings a proposal for a comprehensive test methodology including a discussion of risks and uncertainties with related issues.

KEYWORDS

pre-compliance test, electromagnetic compatibility, electromagnetic susceptibility, numerical simulation, feature selective validation, vehicle

RŮŽEK, V. *Předcertifikační testy elektromagnetické odolnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 186 s., 7 s. příloh. Disertační práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji disertační práci na téma Předcertifikační testy elektromagnetické odolnosti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D, prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi a doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za jejich obětavou a účinnou pomoc při vypracování mé disertační práce. Tato práce by rovněž nevznikla bez porozumění, podpory, trpělivosti a neutuchající motivace mé rodiny. Děkuji zejména mé manželce Bc. Lucii Růžkové a mamince Mgr. Jitce Růžkové za velkou pomoc s jazykovou korekturou a finalizací této práce. Poděkování rovněž patří mému zaměstnavateli, společnosti ŠKODA AUTO a.s., za prostor a technické vybavení, které mi bylo pro vypracování této práce poskytnuto a rovněž kolegům ze společnosti Volkswagen A.G., oddělení EEIZ/W, za velkou pomoc při realizaci certifikačních měření.

Experimentální část této disertační práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

2D – dvourozměrný, dvoudimenzionální parametr

3D – třírozměrný, třídimeznionální parametr

ADMi / ADMc - amplitudové měřítko rozdílu porovnávaných dat (i – bod po bodu, c - hustota pravděpodobnosti)

ALSE – anténní zkušební metoda

AM – amplitudová modulace

BCI – metoda injekce proudu do zkoušeného vedení (Bulk Current Injection)

BEM - metoda hraničních prvků

CAD - počítačem podporovaný design / obecná forma vyjádření konstrukčních geometrických dat

CAN – datová sběrnice používaná v automobilovém průmyslu

CEM - výpočty chování elektromagnetického pole (Computational Electromagnetics)

CFIE - kombinované integrální rovnice

CST, CST MWS - simulační software dodávaný společností CST

CW – nemodulovaný signál (Continuous Wave)

DC - stejnosměrný proud, stejnosměrná složka signálu

DUT - zkoušené zařízení (Device Under Test)

DPS – deska plošných spojů (též PCB)

EMC - elektromagnetická kompatibilita

EFIE - integrální rovnice elektrického pole

ESD – elektrostatický výboj

FDTD - metoda konečných diferencí v časové oblasti

FEM - metoda konečných prvků

FDMi / FDMc - měřítko charakteru rozdílu porovnávaných dat (i – bod po bodu, c - hustota pravděpodobnosti)

FIT - metoda konečných integrací v časové oblasti (Finite Integration Technique)

FM – frekvenční modulace

FSV - softwarový nástroj pro objektivní validaci dat (Feature Selective Validation)

GDMi / GDMc - globální měřítko rozdílu porovnávaných dat (i – bod po bodu, c - hustota pravděpodobnosti)

Hi - označení vysokých frekvencí (např. na filtru typu horní propust)

HW - hardware

IBK - průmyslově vyráběné komponenty (Industrie Bau Kasten)

Lo - označení nízkých frekvencí (např. na filtru typu horní propust)

LIN - datová sběrnice používaná v automobilovém průmyslu

LC – induktivně - kapacitní parametry

MAS – metoda pomocných zdrojů (Method of Auxiliary Sources)

MFIE - integrální rovnice magnetického pole

MoM - metoda momentů

MTL – metoda analýzy elektrických vedení (Multiconductor Transmission Line)

NSA – normalizovaný útlum měřicího pracoviště

OATS - měřicí pracoviště na otevřeném prostoru

PEC - ideálně vodivý materiál (Perfect Electric Conductor)

PEEC - metoda pro řešení obvodových problémů v oblasti modelování elektromagnetických vlastností (Partial Element Equivalent Circuit method)

TEM - transversální elektromagnetická vlna

TLM - metoda přenosových vedení

VUT - Vysoké učení technické v Brně

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

AF - anténní faktor

B - magnetická indukce

C - kapacita

c - rychlost světla ve volném prostoru (vakuu)

$tg\delta$ - ztrátový úhel

d_{well} – doba setrvání na frekvenci

E - intenzita elektrického pole

E_{car} , E_{wv} – intenzita elektrického pole v karoserii vozidla / kompletním sériovém voze

$|E_{tot}|$ - absolutní hodnota intenzity elektrického pole

ε - permitivita

ε_r - relativní permitivita

ε_0 – permitivita vakua

f - frekvence

σ , G - vodivost

H - intenzita magnetického pole

I – elektrický proud

J - proudová hustota (elektrická)

K - kalibrační data / konstanta

L - indukčnost

Δl - délkový úsek / změna délky

λ - vlnová délka

λ_{max} - vlnová délka vztažená k maximální frekvenci prováděného výpočtu

μ - permeabilita

μ_r - relativní permeabilita

r - poloměr, délková vzdálenost

SE - stínící účinnost

t – tloušťka

τ – ztrátový činitel

U - napětí

ω - úhlová frekvence

V - objem

Z - impedance

OBSAH

1.	Úvod do problematiky	- 1 -
1.1.	Provádění zkoušek elektromagnetické odolnosti	- 2 -
1.1.1.	Normalizace a testování EMC v automobilovém průmyslu	- 2 -
1.1.2.	Zkoušky celých vozidel (WV)	- 3 -
1.1.3.	Zkoušky vozidlových komponent (ESA)	- 7 -
1.2.	Předcertifikační zkoušky elektromagnetické odolnosti	- 8 -
1.3.	Možnosti numerických řešení předcertifikačních zkoušek	- 11 -
1.3.1.	Problematika numerických simulací	- 12 -
1.3.2.	Přehled dostupných numerických metod	- 13 -
1.4.	Možnosti validace simulovaných a měřených dat	- 15 -
1.4.1.	Tradiční techniky analýzy	- 16 -
1.4.2.	Aspekty procesu validace dat	- 17 -
1.4.3.	FSV	- 21 -
1.5.	Cíle disertace	- 24 -
2.	Numerické simulace vybraných problémů	- 26 -
2.1.	Základní aspekty numerických simulací v automobilovém průmyslu	- 26 -
2.1.1.	Uvažované výpočetní metody	- 27 -
2.2.	Verifikace dostupných výpočetních metod	- 28 -
2.2.1.	Analytický výpočet rezonančních frekvencí	- 28 -
2.2.2.	Testovací model pro ověření správnosti metod řešení	- 32 -
2.2.3.	Ověření správnosti zvolených numerických metod	- 34 -
2.2.4.	Shrnutí kapitoly	- 54 -
2.3.	Příprava simulačních modelů	- 55 -
2.3.1.	Problematika diskretizace sítě	- 58 -
2.3.2.	Aspekty získání simulačních modelů vozů	- 60 -
2.3.3.	Problematika kabelových svazků	- 64 -
2.4.	Analýza zjednodušení simulačního modelu karoserie	- 65 -
2.4.1.	Definice experimentu	- 67 -
2.4.2.	Získané výsledky	- 68 -
2.4.3.	Shrnutí	- 70 -
2.5.	Vliv pozice zdroje testovacího pole na výsledky numerické simulace	- 71 -
2.5.1.	Definice experimentu	- 71 -
2.5.2.	Získané výsledky	- 72 -
2.5.3.	Shrnutí poznatků	- 78 -
2.6.	Předcertifikační simulace celého vozu	- 79 -
2.6.1.	Doporučení pro předcertifikační simulaci	- 79 -
2.6.2.	Souhrn výsledků ukázkové předcertifikační simulace	- 81 -

2.6.3. Závěr	- 92 -
2.7. Shrnutí kapitoly	- 93 -
3. Předcertifikační měření	- 98 -
3.1. Předmět zkoušky	- 98 -
3.1.1. Holá karoserie vozidla	- 98 -
3.1.2. Kompletní vůz	- 101 -
3.2. Aspekty realizace předcertifikačního měření	- 102 -
3.2.1. Měřicí pracoviště	- 102 -
3.2.2. Technické vybavení pro předcertifikační testy	- 104 -
3.2.3. Zkušební metoda	- 106 -
3.2.4. Kalibrace měřicího pracoviště	- 109 -
3.2.5. Metodika měření intenzity elektrického pole uvnitř karoserie vozu	- 116 -
3.3. Předcertifikační měření na vystrojené karoserii vozu	- 118 -
3.3.1. Naměřené výsledky	- 119 -
3.4. Předcertifikační měření na celém voze	- 127 -
3.4.1. Naměřené výsledky	- 128 -
3.5. Srovnání rozdílů měření na vystrojené karoserii a celém voze	- 131 -
3.6. Shrnutí kapitoly a doporučení pro předcertifikační měření	- 136 -
4. Certifikační měření	- 138 -
4.1. Aspekty certifikačního měření	- 138 -
4.2. Výsledky naměřené na voze Škoda Octavia s plnou střechou	- 140 -
4.3. Výsledky naměřené na voze Škoda Octavia s prosklenou střechou	- 142 -
5. Porovnání výsledků simulací a reálných měření	- 146 -
5.1. Srovnání shody certifikačních a předcertifikačních měření	- 147 -
5.2. Srovnání shody výsledků numerických simulací s předcertifikačními testy na vystrojené karoserii vozu	- 151 -
5.3. Srovnání výsledků numerických simulací s certifikačními testy	- 156 -
5.4. Navrhovaná opatření pro předcertifikační testy	- 161 -
5.4.1. Obecně platná pravidla	- 161 -
5.4.2. Doporučení pro provádění numerických simulací	- 161 -
5.4.3. Doporučení pro provádění předcertifikačních měření	- 164 -
6. Závěr	- 166 -
Literatura	- 168 -
Seznam obrázků	- 175 -
Seznam tabulek	- 178 -
Seznam příloh	- 179 -

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V současné době je každé elektronické zařízení vystaveno množství rušivých vlivů. Ať jsou to již signály užitečné (které není žádoucí odstranit), nebo signály rušivé (které není možné či ekonomicky výhodné odstranit), každý z nich může způsobit výpadek užitečné funkce zařízení. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby každé zařízení bylo proti těmto signálům odolné a dokázalo plnit svou funkci i za jejich přítomnosti. Testováním vlivů rušivých signálů na zařízení se zabývá část elektromagnetické kompatibility (EMC) zvaná elektromagnetická odolnost, případně elektromagnetická susceptibilita (EMS).

Standardizované testy elektromagnetické odolnosti prováděné certifikovanými zkušebnami jsou ze své podstaty finančně velmi nákladné a představují také značnou časovou zátěž při vývoji zařízení. Výrobci se proto snaží přijít s ekvivalentní testovací metodikou, která může být aplikována již v raných stádiích vývoje výrobku a která je finančně i technicky dostupná i pro menší společnosti. Testy tak mohou být namísto v certifikované zkušebně prováděny přímo na vývojovém pracovišti. V ideálním případě pak tyto testy zcela, nebo částečně, zajistí budoucí schválení výrobku a výrazně urychlí vývoj zařízení, včetně kýženého snížení celkových nákladů.

Z hlediska EMS můžeme jako předcertifikační test označit takový test, který není prováděn oznámeným subjektem, případně nejsou při jeho provádění dodrženy všechny normou předepsané podmínky a postupy. Nejčastější rozdíly mezi plnohodnotnými a předcertifikačními testy bývají v použité měřicí metodě, volbě přístrojů, konfiguraci pracoviště či vynechání některých předepsaných částí zkoušek. Rostoucí počet odchylek od standardních postupů ovšem zvyšuje neurčitost celého měření a měřicího procesu [1].

Snahou tvůrců předcertifikačních testů je, aby tento typ testu umožnil zejména snížení nákladů při vývoji a testování zařízení, přičemž by ale dokázal spolehlivě odhalit konstrukční nedostatky zařízení, které by způsobily jeho neúspěšné testování v akreditované zkušebně při certifikačních testech. Důležitým aspektem je též zkrácení doby vývoje výrobku: pokud společnost disponuje vlastními testovacími prostředky pro provádění předcertifikačních testů, dosáhne velké časové úspory díky tomu, že není nutné výrobek zasílat do zkušebny po provedení pouze dílčích úprav. S tím souvisí i výrazné zkvalitnění celkových EMC vlastností výsledného zařízení: jednotlivé části mohou být testovány již během vývoje a jako celek pak budou dosahovat mnohem lepších výsledků, než kdyby se testování EMC během vývoje zanedbalo a začalo se řešit až ve fázi kompletnosti celku [2].

Předcertifikační testy nemusí být prováděny pouze formou reálných měření. Ještě před začátkem výroby prototypu je velmi výhodné ověřit navrhovanou konfiguraci výrobku pomocí specializovaného simulačního softwaru. Tato metodika může výrazně snížit vývojové náklady zejména u složitých celků, kde existují interakce mezi velkým množstvím součástí – vhodným příkladem jsou osobní automobily.

Tato práce si klade za cíl definovat a vyzkoušet způsoby provádění předcertifikačních zkoušek v prostředí automobilového průmyslu, doplnit je o použití numerických metod a začlenit tento aspekt do vývoje nových typů automobilů s cílem urychlit a výrazně zlevnit komplexní vývoj vozu v této oblasti.

1.1. PROVÁDĚNÍ ZKOUŠEK ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI

Komplexní elektrické vybavení je klíčovou součástí dnešních automobilů a tvoří až 30 % celkové ceny vozu. Délka svazků palubní sítě dosahuje více než 2 500 m a počet řídicích jednotek se u běžně vybaveného automobilu nižší střední třídy pohybuje mezi 20 až 30 ks [2]. Veškerá elektronická zařízení ve vozech pracují ve velmi širokém kmitočtovém rozsahu, od stovek kHz až po desítky GHz. Ve vozidle jsou též instalovány antény různých bezdrátových služeb (FM, DAB, TV, GSM, LTE, GPS, Bluetooth atd.). Automobil a všechny jeho elektronické systémy jsou tak (chtěným i nechtěným) příjemcem jak vnějších, tak vnitřních elektromagnetických signálů.

Můžeme proto oprávněně předpokládat, že pravděpodobnost vzájemného elektromagnetického ovlivňování těchto systémů je velmi vysoká. Z toho vyplývá, že pro správnou a bezpečnou funkci těchto systémů je zajištění vzájemné elektromagnetické kompatibility nezbytné. Na rozdíl od posuzování běžných výrobků (např. pro domácí či kancelářské použití) zde hraje zajištění EMC i významnou bezpečnostní úlohu, neboť selhání některého z vozidlových systémů může způsobit i havárii celého vozu a tím i ohrožení lidských životů [3].

1.1.1. NORMALIZACE A TESTOVÁNÍ EMC V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

První evropská směrnice postihující problematiku potlačování elektromagnetického rušení vznikajícího při činnosti zážehových motorů ve vozidlech (72/245/EEC) vznikla teprve v roce 1972. Nové verze a významného rozšíření pokrývajícího většinu elektrického vozidlového příslušenství a též celého vozidla z hlediska EMC se tato směrnice dočkala až v roce 1995 (95/54/EC). Tato směrnice poprvé začlenila problematiku automobilové EMC do legislativy Evropské unie i dalších zemí. V roce 2004 byla pak přijata nejnovější směrnice 2004/104/EC [4] pro EMC vozidel a jejich elektronického vybavení. Tato směrnice byla v následujících letech několikrát aktualizována (2005/49/EC, 2005/83/EC a 2006/28/EC [5]). Další informace lze nalézt v [2].

Je-li posuzována elektromagnetická kompatibilita vozidla, je vždy nezbytné posoudit jednak EMC vlastního vozu jako celku, a to včetně všech pevně zabudovaných elektrických komponent sloužících k pohonu, ovládání a řízení systémů vozidla, ale i EMC doplňkových součástí a komponent, které mohou být do vozidla volitelně zabudovány (prvky jednotlivých komfortních výbav automobilu, komponent na přání apod.). První oblast posuzování EMC je označována jako Whole Vehicle – WV, druhá je nazývána Electronic Sub Assembly – ESA. Samotné EMC testy lze rozdělit do skupin podle aplikace příslušného testu. Tyto testy EMC jsou pak aplikovány jak na WV, tak i na ESA. Jednotlivé testy EMC lze dle jejich povahy rozdělit do následujících skupin:

- testy rušivého vyzařování (radiated emissions),
- testy rušivých signálů na vedení (conducted emissions),
- testy odolnosti vůči vnějším elektromagnetickým polím (radiated immunity),
- testy odolnosti vůči rušivým signálům na vedení (conducted immunity),
- testy odolnosti vůči elektrostatickým výbojům (ESD immunity).

Výše uvedené skupiny testů se v různých částech světa realizují dle odlišných norem a standardů. V prostředí evropského trhu je základní normou pro testování EMC vozidel Směrnice 2014/30/EU [6]. Tento standard se v oblasti testů rušivého vyzařování přímo odvolává na normy CISPR 25 [7] a CISPR 12 [8] vydané Mezinárodní elektrotechnickou komisí - International Electrotechnical Commission (IEC), v oblasti elektromagnetické odolnosti pak na standardy ISO 7637 [9], [10], [11]; ISO 11451 [12], [13], [14], [15] a ISO 11452 [16], [17], [18], [19] vydané Mezinárodní organizací pro normalizaci ISO.

Kromě výše uvedených norem, stanovených mezinárodními normalizačními autoritami, je běžné, že každý významný výrobce stanovuje své vlastní podnikové či koncernové požadavky zakotvené v interních standardech. Například koncern Volkswagen, jehož součástí je i společnost ŠKODA AUTO a.s., využívá pro posouzení EMC koncernové normy řady TL, společnost BMW pak normy řady GS, Daimler-Chrysler normy řady DC a Ford pak normy řady ARL. Důvodem pro tvorbu vlastních standardů jsou často mnohonásobně vyšší nároky na testovaná zařízení a jejich různá specifika, která nejsou v běžných standardech podchycena. Zajímavostí ale zůstává, že testovací metodika nebývá příliš odlišná a podnikové standardy se často odvolávají právě na obecné normy. Změněny v těchto případech pak často bývají pouze úrovně rušení, které zařízení smí vyzařovat, respektive vůči kterému má být odolné.

Speciální částí normalizace jsou tzv. homologační zkoušky. Jedná se o zkoušky prokazující splnění veškerých požadavků z hlediska EMC na vozidlo kladených autorizované osobě, skrze jeho oznamovaný technický servis (v případě ŠKODA AUTO a.s. se jedná o společnost TÜV Süd Czech). Oznamovaný technický servis (recognized technical service) na základě doložených výsledků vývojových zkoušek a přímé účasti při homologační zkoušce vytvoří „Technickou zprávu pro schválení“. Tato dokumentace je předána autorizované osobě (Ministerstvo dopravy), která na jejím základě provede schválení nového typu vozidla do provozu („Osvědčení o schválení typu“). Technické požadavky kladené na schválení vozidla definuje předpis Evropské hospodářské komise OSN ECE-R10.5 [20]. Oproti koncernovým normám jsou jeho požadavky velmi zjednodušeny, avšak stále zaručují dostatečnou úroveň bezpečnosti vozidla v provozu. Vlastní zkouška se skládá ze tří částí:

- zkoušky vyzářeného rušení v blízkém poli,
- zkoušky vyzářeného rušení ve vzdáleném poli,
- zkoušky odolnosti vůči vyzářeným elektromagnetickým polím.

Zkoušky ESD, stejně jako zkoušky pulzů vedených po palubní síti, se neprovádí. Zkušební metodiku, povolené limity vyzářeného rušení a intenzity zkušebních polí lze nalézt v [20].

1.1.2. ZKOUŠKY CELÝCH VOZIDEL (WV)

Pro ověření elektromagnetické odolnosti celého vozidla je vypracováno několik standardů, které definují požadavky na elektromagnetickou odolnost vozidla jako celku. Vlastní požadavky bývají rozděleny na externí zdroje rušení (tzv. off-vehicle sources) a interní zdroje rušení (tzv. on board transmitter simulation). Výrobci automobilů v Evropě používají metodiku odvozenou od ISO 11451-2 [13] pro odolnost vůči externím zdrojům rušení a ISO 11451-3 [14] pro odolnost vůči interním zdrojům rušení. Americký automobilový průmysl využívá normy SAE J551-11 [21] pro externí zdroje, respektive SAE J551-12 [22] pro interní zdroje rušení.

Jednotlivé standardy se od sebe vzájemně odlišují v požadavcích na vzdálenost testovacích antén od vozidla, testovacích frekvencích, v intenzitách zkušebních polí, ale ne v metodice měření. Můžeme tedy obecně shrnout, jaká jsou základní specifika těchto testů.

Americká norma SAE určuje minimální vzdálenost testovací antény od středu motoru vozidla 2 m. Oproti tomu norma ISO definuje vzdálenost 3 m od geometrického středu vozidla. Z toho vyplývá určitá rozdílnost v pracovištích používajících evropské či americké standardy.

Frekvenční rozsah zkoušek je v případě standardů ISO 11451-2 [13] 0,1 – 3000 MHz, což ovšem nemusí být v blízké době zejména shora hranice konečná, především z důvodu nárůstu mnoha služeb pracujících na frekvencích až do 6 GHz. Zkoušky jsou obvykle prováděny pro vertikální i horizontální polarizaci, často z více směrů k vozidlu.

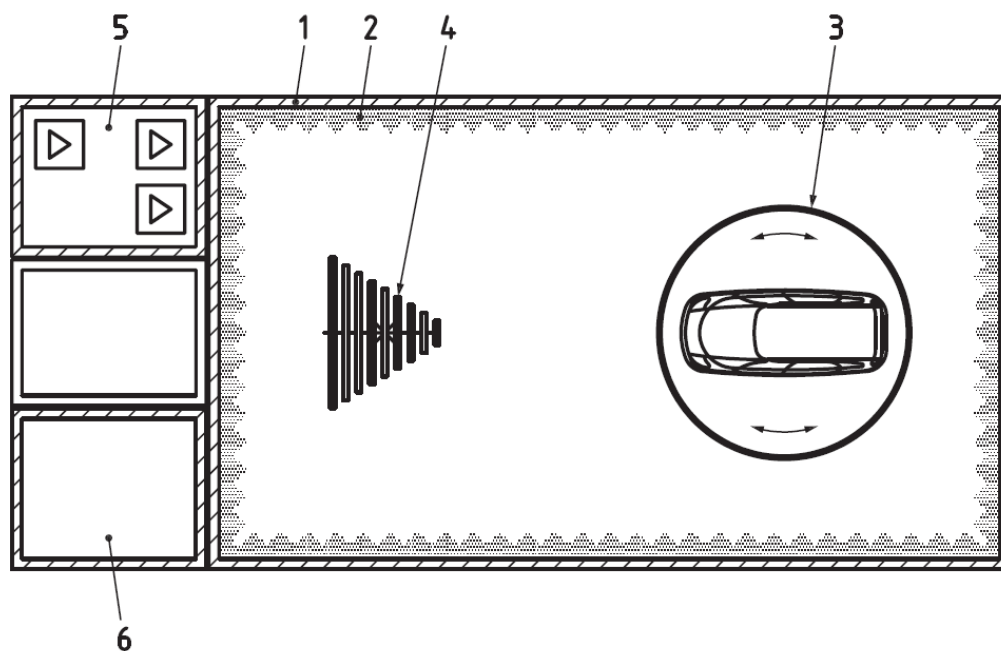
Standard ISO 11451-2 [13] definuje proměnnou intenzitu testovacího signálu v závislosti na zkušební frekvenci v rozsahu 70 do 140 V/m. Pro většinu frekvencí je použita amplitudová modulace (AM) testovacího signálu (základní kmitočet 1 kHz s hloubkou modulace 80%) přičemž může být nahrazena prostou nosnou frekvencí (CW). Pouze na vybraných frekvencích (např. 806 – 915 MHz) je použita fázová modulace (PM) testovacího signálu. Pro účely testování jsou použity obě polarizace, vertikální má být použita v celém frekvenčním rozsahu zkoušek, horizontální pak v rozsahu 30 – 3 000 MHz. Přírůstek frekvence Δf závisí na aktuálním frekvenčním rozsahu a pohybuje se od 0,1 po 10 MHz. Doba setrvání (d_{well}) na jednom testovacím kmitočtu je minimálně 1 sec, s rostoucí délkou odezvy systému na rušivý signál se prodlužuje i doba setrvání na jedné testovací frekvenci. Pro každou úroveň testu (L1¹, respektive L2) a kategorii poruchy (1, 2 a 3) je stanovena minimální hranice úrovně intenzity elektromagnetického pole.

Elektromagnetické pole může být vybuzeno i uvnitř vozidla pomocí mobilního telefonu, nebo jiného přenosného rádiového vysílače. Uvedená zařízení disponují integrovanou anténou a je tedy velmi jednoduché umístit je v interiéru prakticky kamkoliv. Proto norma ISO 11451-3 [14] definuje pro unifikaci testovací metodiky místa s nejpravděpodobnějším výskytem těchto zařízení. Jedná se například o prostor předních a zadních sedadel, kapsy ve dveřních výplních, odkládací přihrádky na středovém tunelu, přihrádky na palubní desce a v blízkosti kabelových svazků a čidel. Zvláště poslední varianta nabízí velmi širokou variabilitu testovací metodiky, neboť kabelové svazky procházejí naprostou většinou dutých prostorů v karoserii, která prostor pro posádku obklopuje. Je tedy nasnadě zaměřit se na způsob, jakým může vysílač umístěný v interiéru vozidla ovlivnit právě kabelové svazky, chování řídicích jednotek a k nim připojených snímačů.

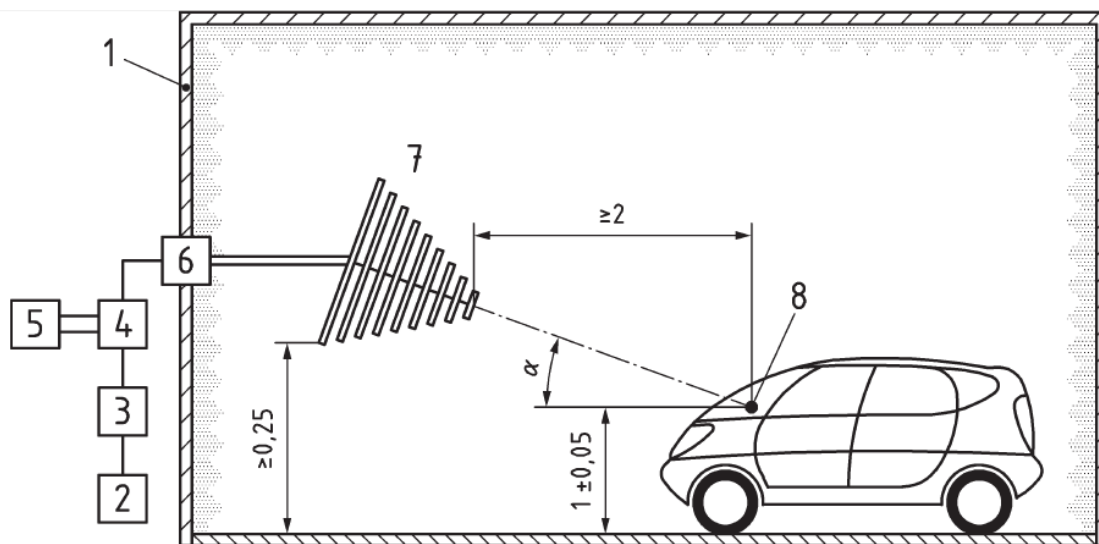
Doplňková měření elektromagnetické odolnosti ve volném prostoru se provádí v rámci rozšířených vozidlových testů. Měření má být realizováno v blízkosti dlouhovlnných a středovlnných vysílačů velkých výkonů ve frekvenčním pásmu 0,15 – 1,65 MHz. Doporučeny jsou i testy v blízkosti krátkovlnných vysílačů, testované pásmo je potom v rozsahu 4 – 26 MHz.

¹ L1, resp. L2 vyjadřuje dle FPSC stavy zařízení, které mohou při zkoušce nastat. Statusem L1 označujeme nezměněnou funkci zařízení před, během i po zkoušce. Statusem L2 pak změnu funkce při zkoušce s automatickým návratem k původní funkci po jejím ukončení.

Konfigurace testu vůči externímu zdroji rušení je v případě obou zmíněných základních norem stejná a je možno ji vidět na obrázku (Obr. 1). Vozidlo se nachází v prostředí částečně bezodrazové stíněné komory (1), vybavené příslušnými absorbéry (2) a zemní rovinou. Toto prostředí má umožňovat realizaci testu za běžných podmínek, tedy v jízdě a se zapnutými veškerými spotřebiči – z tohoto důvodu je stíněná komora vybavena zkušební stolicí s dynamometrem (3). Zkušební pole je generováno anténami (4), napájenými výkonovými zesilovači (5) umístěnými v mimo zkušební komoru.



Obr. 1 - Přehledové schéma pracoviště zkoušek odolnosti vůči vnějším zdrojům rušení dle ISO 11451-2. Převzato z [12].



Obr. 2 – Schéma realizace zkoušky odolnosti vůči vnějším zdrojům rušení dle ISO 11451-2. Převzato z [12].

Provádění zkoušky (Obr. 2) je předepsáno ve stíněné, částečně bezodrazové komoře s vodivou zemní rovinou (1). Jako zdroj zkušebního signálu slouží vysokofrekvenční generátor (2), na potřebnou úroveň je tento signál zesílen výkonovým zesilovačem (3).

Vazební člen (4) ve spojení s měřičem výkonu (5) zajistí správnou úroveň testovacího signálu. Do zkušební komory (1) je signál veden koaxiálními průchodkami (6) a do formy elektromagnetického pole je přeměněn pomocí anténních struktur (7). V bodě (8) se nachází referenční bod měřicí komory, důležitý zejména pro správnou kalibraci vysílací aparatury.

Pro vlastní realizaci zkoušky je ovšem také nezbytné zkušební pracoviště vybavit řadou dalších doplňkových zařízení umožňujících správné a bezpečné provedení zkoušky, včetně jejího monitorování – ne jen z hlediska EMC.

Pracoviště musí být proto vybaveno:

- zařízením na odtah výfukových plynů,
- chlazením vozidla čerstvým vzduchem,
- robustním hasicím zařízením,
- technikou pro monitorování jízdních parametrů vozidla,
- diagnostickou technikou pro dohled nad vozidlem,
- technikou pro dálkové ovládání vozidla.

Ventilační systém musí během zkoušky zajistit dostatečnou dodávku čerstvého vzduchu určeného pro vlastní proces spalování motoru a zejména pro chlazení vozidla proudem vzduchu. Moderní systémy regulují rychlost proudění chladicího vzduchu podle aktuální rychlosti vozidla, čímž i aktivně regulují jízdní odpor. Stejně tak musí být k dispozici systém na odtah výfukových plynů vznikajících při spalování, a to jak přímo připojený ke koncovce výfuku zkoušeného vozu, tak i z celé komory.

Vzhledem k enormně vysokým nákladům na vybudování a provoz pracoviště zkoušek odolnosti jsou tato zařízení vybavena sofistikovaným automatickým hasicím zařízením. Jako hasicí médium se používá inertní plyn, obvykle CO₂. Vozidlo musí být během jízdní zkoušky dokonale upevněno a jeho jízdní parametry musí být neustále monitorovány. Proto je dynamometr a jeho ovládací SW propojen do centrálního řídicího programu, aby byla obsluha včas informována o případných anomáliích a hrozícím riziku.

Nejsložitější součástí výbavy je zřejmě dohledová a diagnostická technika. Ta se obvykle skládá z kamerového systému pro vnější a vnitřní monitoring vozidla, oddělené diagnostické sběrnice pro udržování neustálého přehledu nad stavem vozidla, vozidlových datových sběrnic (obvykle CAN, LIN, Flex-Ray, nebo ETHERNET) a nástrojů pro dálkové ovládání vozidla (aktuátory pro stisk tlačítek, dálkově řízené spínače, apod.). Je potřeba uvážít, že veškeré tyto technické systémy musí být konstruovány jako EMC-ready, tedy odolné proti velmi vysokým intenzitám vnějších polí a zároveň jako nerušící, při použití zařízení pro zkoušky rušivého vyzařování. Častým řešením je proto datová komunikace těchto zařízení pomocí optických vláken, napájení ze stíněných baterií, případně ovládání stlačeným vzduchem, atd.

Reálnou podobu výše popsaného pracoviště ukazuje obrázek (Obr. 3). Z výše uvedeného vyplývá, že provádění zkoušek odolnosti vůči vnějšímu rušení je extrémně nákladnou záležitostí. Je to způsobeno velmi vysokými pořizovacími náklady na celou testovací aparaturu včetně stavební části a následnou nezbytnou údržbu a kalibraci. Běžná hodina zkoušky obvykle stojí 1 000 – 1 500 EUR, což při celkovém čase stráveném zkouškami jednotlivých systémů v různých konfiguracích představuje ve vývoji vozu velmi vysoké náklady.



Obr. 3 – Reálné pracoviště zkoušek odolnosti vůči vnějšímu elektromagnetickému poli.

1.1.3. ZKOUŠKY VOZIDLOVÝCH KOMPONENT (ESA)

Jednotlivé součásti elektronického vybavení automobilu jsou pro jejich producenty obvykle na zakázku vyvíjeny a následně vyráběny externími společnostmi. V režii těchto externích dodavatelů je komplexní vývoj, parametrizace a zkoušky daných součástí, dle dopředu dohodnutých a zadavatelem přísně sledovaných požadavků. Komplexní zkoušky EMC nejsou v tomto procesu žádnou výjimkou.

Vzhledem k obvykle nastavenému režimu, kdy dodavatel průběžně informuje výrobce vozidla o dílčích výsledcích získaných během vývoje, tvoří zkoušky komponentů základní kámen v poznání dané součásti z pohledu EMC. Zkouška komponentů je tak výchozí zkouškou EMC celého vozidla, neboť platí, že pokud příslušná část úspěšně splní kritérium dané pro komponentní zkoušku, tak s relativně vysokou pravděpodobností vyhoví i zkouškám v celku vozidla. Míra této pravděpodobnosti je však stále předmětem zkoumání [23],[24],[25].

Nejčastějším problémem dílů, které spolehlivě splnily požadavky komponentních zkoušek, jsou interakce se systémy, které nebyly při zkoušce daného dílu přítomny – poprvé společně tyto systémy interagují až po zástavbě ve vozidle. Typickou ukázkou je například nesprávná funkce systému virtuálního pedálu, který je ovlivněn při zkoušce odolnosti vůči ESD prováděné na systému parkovacího radaru. Oba systémy jsou sice prostorově odděleny, ale v úseku 45 cm mají společné vedení a také společný zemní bod. Elektromagnetickou indukci se rušivý jev ze zkoušeného systému přenesl do systému „obětí“, která následně vykazuje poruchu.

Z hlediska odolnosti vůči elektromagnetickému poli výrobci nejčastěji používají metody definované ve standardech ISO 11452-1 až 4 [16],[17],[18],[19] a 11452-5[26]. Jedná se o obecnou definici zkušební metodiky a obecných principů [16], zkušební metody používané ve stíněných komorách [17], popis zkoušek prováděných pomocí TEM buněk² [18], metody vybuzení vozidlových svazků [19] a často využívanou metodu zkoušky pomocí páskového vedení – strip line [26].

Pro komponenty náležící do skupiny IBK – průmyslové montáže, jsou závazné testy dle ISO 11452-4 [19] (BCI) a ISO 11452-2 [17] (anténní metoda). Jedná se zejména o díly s bezpečnostně relevantní funkcí, tedy díly ohrožující svou nesprávnou funkcí majetek, zdraví, či život posádky vozidla, nebo jeho okolí. Jako příklad můžeme uvést jednotku řízení brzd (ESP), posilovače řízení, airbagů a další. Pro tyto komponenty jsou nastaveny přísnější limity testování, včetně aplikace jiných testovacích metod (viz výše).

Pro komponenty, které do skupiny IBK nenáležejí, je možno použít test dle ISO 11452-5 [26] (strip line). Jedná se obvykle o díly komfortní a zábavní elektroniky, tedy o rádia, navigace, klimatizace, ozdobné osvětlení a další podobné díly.

1.2. PŘEDCERTIFIKAČNÍ ZKOUŠKY ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI

Z kapitoly 1.1 jednoznačně vyplývá, že provádění zkoušek elektromagnetické kompatibility je časově a zejména finančně extrémně nákladnou položkou při vývoji jakéhokoliv zařízení. Automobilový průmysl není v tomto oboru žádnou výjimkou, navíc při uvážení bezpečnostních rizik plynoucích ze selhání elektrického vybavení vozidla právě v důsledku EMC. Existuje ovšem oprávněný zájem o maximální úsporu během vývojových zkoušek vozidla. Proto velká řada společností i jednotlivých autorů zpracovává postupy, jakým způsobem zkoušky EMC zlevnit, zjednodušit a zrychlit, při akceptovatelné míře nejistoty dosažených výsledků. Vzhledem k tomu, že se často jedná o pečlivě chráněná know-how daných společností, existuje relativně malé množství dostupné literatury a článků popisujících danou problematiku.

Významnou roli předcertifikačním testům připisuje i řada dodavatelských firem. Účelem provádění testů na modulové úrovni, během validace designu (DV) a při procesní validaci (PV), je zabránit pozdnímu odhalení chyb návrhu až ve fázi integrace dílu ve vozidle. Díky včasné identifikaci a odstranění problémů v ověřovacích smyčkách mohou být uspořeny významné projektové náklady. Provádění změn designu v pozdních fázích vývoje má několik negativních vlivů, které mohou poškodit spolehlivost již funkčního a vyzkoušeného systému, způsobit neočekávané projektové náklady, posouvat problém vznikající v jednom systému do systémů dalších, případně způsobit výrobní problémy. Nejdůležitějším aspektem je pak správná identifikace technického řešení způsobujícího problémy daného systému a jeho nahrazení řešením EMC relevantním.

Ke správnému odhadu potřeb předcertifikačních testů musí být shromážděny informace z různých zdrojů. Během vývoje počátečního designu by vývojový tým měl zaznamenat veškerá rizika ohrožující dosažení conformity. Tato varování by měla být dokumentována v EMC kontrolním plánu a následována takovými designovými

² Zkušební komora umožňující generování transversálního elektromagnetického pole bez nežádoucího vyzařování do okolí.

opatřeními, která tyto EMC hrozby eliminují. Slabá místa v designu mohou být jednoduše tvořena harmonickými hodinových signálů, které spadají do citlivých frekvenčních pásem, případně obvody citlivé na intenzivní vysokofrekvenční pole. Navíc skrze zkušenosti s požadavky zákazníka a nasazenými vozidlovými systémy by měl vývojový tým včas rozpoznat klíčové oblasti, pro které by musela být nasazena specifická technická řešení. Pokud produkt například obsahuje vysokofrekvenční obvody, strmost pásmových propustí na jeho vstupech musí být významně zvýšena [27]. Znamená to tedy, že dodavatelé spatřují již první možnost, jakým způsobem provádět předcertifikační testy, ve správné metodice návrhu a respektování interních pravidel systematicky odhalujících a dokumentujících potenciální zdroje problémů v dalších vývojových fázích výroby.

Podstatnou částí vývoje předcertifikačních testů jsou i korelační metody [28]. Předcertifikační testy založené na korelaci měřicího místa jsou zatíženy vlastní měřicí nejistotou. Konvenční korelací je pak myšlen iterační proces, kde je známý zdroj měřen nejprve na předcertifikačním pracovišti a následně na pracovišti certifikačním. Získaná data jsou následně porovnána, je stanoven korekční faktor a tento periodicky vyhodnocován [28]. Některé metody vyžadují provedení rozsáhlých studií ke stanovení korekčního faktoru [29], zatímco jiné jsou zaměřeny teoreticky [30]. Pro dobře známé měřené struktury je korelace mezi jednotlivými měřicími místy široce udržována pomocí normalizovaného útlumu měřicího pracoviště (NSA). Tato měření využívají definovaný pár vysílacích / přijímacích antén pro měření charakteristiky signálové trasy. Místa s dobrou korelací mohou teoreticky dosáhnout rozdílu ± 4 dB, tedy variaci mezi jednotlivými měřicími místy až 8 dB. V případě měření nestandardního, či neznámého zařízení je pozorována podstatně větší variace. Současné studie [29] ukazují, že rozdíly mezi jednotlivými měřicími místy mohou překročit až 20 dB a zahrnují poznatek, že korelace mezi jednotlivými měřicími metodami nemůže být použita pro komplexní systémy [31]. Těchto poznatků lze využít při budování vlastní metodiky předcertifikačních testů a zejména způsobů jejich korelace s výsledky certifikačních měření.

Významnost předcertifikačních testů prováděných ve shodě s ISO 11452-2 (ALSE) a ISO 11452-4 (BCI) je zmiňována i v dalších publikacích, např. v [32]. Tyto metody jsou nejčastějšími způsoby ověření odolnosti elektrického zařízení, kdy je elektromagnetická energie vázána různými cestami do testovaného kabelového svazku v prostoru vozidla. Zatímco anténní metoda (ALSE) vyžaduje použití stíněné komory s vysoce výkonnými zesilovači, požadavky BCI metody jsou podstatně menší. Z těchto důvodů se stává BCI častou náhradou ALSE. Bohužel korelace mezi ALSE a BCI je často velmi nízká, což vypovídá schopnost takového předcertifikačního testu velmi snižuje. Ve snaze zajistit lepší shodu výsledků mezi oběma uvedenými metodami bylo publikováno několik dále zmíněných prací, uvádějících různou komplexitu a omezení týkající se tohoto tématu.

Článek [33] upozorňuje na značnou neshodu výsledků získaných pomocí jednotlivých metod a navrhuje použití vícečetné, nebo distribuované vazební techniky pro dosažení lepší shody obou metod. V [34] je prezentována metoda založená na poznání, že dva různé způsoby excitace (injekce a elektromagnetické záření) způsobují různou proudovou distribuci z důvodu, že elektromagnetické záření je rozprostřeno přes délku testovaného vedení, kdežto injekce tvoří pouze jediný diskrétní zdroj. Pokud je pak testované vedení elektricky krátké, výsledky redukuje platnost teorie obvodů, která běžně definuje, že proud je konstantní po celé délce vedení.

Práce [35] popisuje analytické srovnání buzení pomocí vnějšího pole a proudové sondy do kabelového svazku. Pro účely experimentu byl svazek modelován jako uniformní bezztrátový MTL (multi-conductor transmission line) umístěný nad zemní rovinou. Model pro odhad předcertifikačního výsledku využívá popis vazby do MTL

pomocí rovinné vlny v případě záření a ideální napěťový zdroj v případě injekce proudovou sondou. Možná podobnost mezi injekcí a zářením je zkoumána úpravou MTL jako více-portového zařízení a jeho vztahy k Theveninovu teorému. Práce nalézá statistickou ekvivalenci naznačující napěťovou závislost sondy na různých parametrech (frekvence, délka vedení, umístění proudových kleští a vlnovou charakteristiku). Je rovněž ukázáno, že použití jedné proudové sondy není dostačující k dosažení uspokojivé shody obou metod, přičemž se tato shoda výrazně zvyšuje při použití dvou a více sond.

Výsledky [36] potvrzují, že použití alespoň dvou proudových sond, jedné na začátku testovaného vedení a druhé na jeho konci, můžeme dosáhnout významně vyšší shody výsledků mezi ALSE a BCI. Dále jsou rovněž diskutovány možnosti variabilního nastavení injektovaného rušivého proudu a alternativní umístění proudových kleští [37].

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud se budeme zabývat problematikou předcertifikačních zkoušek elektromagnetické odolnosti, máme k dispozici tyto primární zkušební postupy, ze kterých můžeme vycházet:

- 1) zkoušky založené na anténní metodě (ALSE),
- 2) zkoušky pomocí injekce proudových pulzů (BCI).

Ad 1) V případě aplikace ALSE jako zkušební metody můžeme uvažovat způsoby její modifikace za účelem zjednodušení, zlevnění a zrychlení zkušební metodiky. To můžeme spatřovat v následujícím.

- a) Snížení intenzity zkušebního pole na konstantní úroveň (např. 1 V/m) dosažitelnou v porovnání s certifikačními testy levnou a dostupnou měřicí technikou. Naměřené hodnoty takto dosažené intenzity následně vhodnou matematickou úpravou převést do předpokládané standardní zkušební intenzity a identifikovat riziková místa s lokálně zvýšenou intenzitou pole.
- b) Redukci počtu zkoušených frekvenčních pásem v závislosti na parametrické a kritériální analýze zkoušených předmětů. Z výše uvedených zdrojů, i z vlastní dlouholeté zkušenosti, vyplývá, že určitá DUT³ jsou citlivá ve specifických frekvenčních pásmech, přičemž tato vlastnost se bez zásadní změny HW designu zařízení nemění. Celkový počet testovaných frekvencí se pak může snížit až o 90 % na frekvence identifikované analýzou jako rizikové.
- c) Použití pouze vybrané polarizace zkušebního pole v závislosti na vlastnostech a dominantním rozmístění zkoušených předmětů v dutině vozidla. Polarizace zkušebního pole dominantně určuje směr kmitajícího vektoru elektrické intenzity. Orientace tohoto vektoru ve vztahu k příčnému nebo podélnému uložení vodičů elektrické instalace, společně s pozicí vozidla při zkoušce (z čela, z boku) určuje, jak vysoká rušivá napětí se budou indukovat do těchto svazků. Pro potřeby předcertifikačních testů můžeme provádět zkoušky pouze jednou vybranou polarizací vzhledem k pozici vozidla a uspořít tak až 50 % nákladů na zkoušku.
- d) Realizaci zkoušky mimo stíněnou komoru, případně její nahrazení stíněným stanem. Hlavním problémem realizace zkoušky mimo stíněnou komoru je rušení okolního prostředí zkušebním polem, ne tolik již vliv vnějšího prostředí na zkoušený předmět. Zkoušku tak můžeme provést na místě, kde nebude zkušební pole působit problémy, nebo zkoušku přesunout do tzv. stíněného stanu – tedy do podstatně levnější varianty stíněné komory.

³ Zkoušené zařízení (Device Under Test).

- e) Realizaci zkoušky zkušebním polem generovaným přímo v interiéru vozidla. Při tomto přístupu má vnitřní prostor vozu duální využití. Při prvním pohledu slouží jako rezonanční dutina, ve které při relativně nízkém výkonu můžeme vybudit jednotlivé rezonanční módy a získat dostatečnou intenzitu pole pro zkoušku. Z druhého pohledu karoserie vozidla tvoří nedokonalou Faradayovu klec, která však dokáže pohltit významnou část zkušebního pole, jež by vně karoserie působilo problémy.

Ad 2) Použití BCI metody není typickou zkouškou pro ověření odolnosti celého vozidla, můžeme ji však s výhodou použít jako nástroj předcertifikační zkoušky pro ověření vozidlových subsystémů již instalovaných ve vozidle, mající tak přímý vliv na kompletní elektrickou výbavu vozidla. Stejně jako v případě ALSE můžeme i v případě BCI pozorovat zjednodušení, zlevnění a zrychlení zkušební metodiky v následujících bodech.

- a) Výběr vhodné pozice zkušebních kleští a jejich celkového počtu na vodiči za účelem dosažení co nejvyšší shody s výsledky anténní metody.
- b) Identifikace správného způsobu napájení proudových kleští, včetně variabilního výkonu do nich dodávaného.

Všechny výše uvedené postupy vyžadují teoretickou analýzu a důkladné experimentální ověření na dostatečném počtu výskytů pro nutné statistické vyhodnocení. Je nezbytné diskutovat dostupné metody validace získaných dat, zejména ve vztahu certifikačního měření, předcertifikačního měření a případné numerické simulace.

1.3. MOŽNOSTI NUMERICKÝCH ŘEŠENÍ PŘEDCERTIFIKAČNÍCH ZKOUŠEK

Díky dynamickému rozvoji numerických metod v 60. až 70. letech 20. století a následnému masivnímu rozšíření a zvýšení výkonu osobních počítačů je v dnešní době možné počítačově simulovat téměř libovolný vědecký problém. Elektrotechnika a konkrétně oblast elektromagnetické kompatibility nejsou v tomto rozvoji výjimkou. V dnešní době existuje velké množství softwarových nástrojů schopných numericky řešit i různé oblasti elektromagnetické odolnosti. Jedná se zejména o problematiku simulací konstrukčních celků umístěných do elektromagnetických polí, dále pak elektrostatických nábojů a analýzu rušení vnikajícího do kabelových svazků vozu. Tyto simulace je možné provádět v různých frekvenčních rozsazích, vždy však v oblasti zcela pokrývající reálné potřeby problematiky [38].

Analýza elektromagnetické odolnosti vozů za pomoci simulačních nástrojů může výrazným způsobem urychlit a zjednodušit vývoj nových typů automobilů. Díky znalosti rozložení intenzit elektromagnetického pole je možné určit, kde dochází k vlastním rezonancím karoserie vozu a na základě těchto znalostí vhodně umístit či správně dimenzovat prvky elektrické instalace vozu (řídící jednotky a kabelové svazky). Zároveň se numerické simulace nabízí jako velmi vhodný ekvivalent k navrhovaným předcertifikačním měřením za účelem ověření vzájemné korelace.

1.3.1. PROBLEMATIKA NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Pokud uvažujeme při matematických výpočtech reálné, tedy nehomogenní prostředí, je nezbytné, aby bylo toto prostředí rozděleno na dílčí oblasti, které můžeme pro tento výpočet považovat za homogenní. Musíme tedy definovat určitý počet oblastí I o různých tvarech, které se ovšem určitou plochou vzájemně dotýkají. V těchto hraničních místech dochází ke skokové nespojitosti parametrů materiálu. V prostředí se může vyskytnout i zcela speciální oblast reprezentující ideálně vodivé prostředí (V_0). V takové oblasti je elektrické i magnetické pole nulové.

Při řešení elektromagnetického pole můžeme narazit na různé problémy, které se při aplikaci numerických metod mohou objevit. Můžeme je klasifikovat z hlediska výchozího tvaru rovnic, tj. z hlediska výsledného zadání matematické úlohy [39] následujícím způsobem.

- 1) Vysílací anténa je zdrojem elektromagnetického pole. Fyzikálně jsou to elektrické proudy, které tečou po vodičích různých tvarů – jedná se ovšem o proudy neznámé. Ze zadání úlohy obvykle známe napětí na vstupních svorkách antény. K určení těchto neznámých proudů dostaneme nehomogenní integrální či integro-diferenciální rovnice. Jejich řešení následně umožní určit elektromagnetické pole vytvořené těmito zdroji v okolí vodičů vysílací antény.
- 2) Dopad vlnění na obecnou překážku. Tento typ problému může být řešen homogenní rovnicí.
- 3) Vlastní rezonance uzavřeného objemu. Řešení tohoto problému odpovídají homogenní rovnice pro elektromagnetické pole bez zdrojového členu.

Klasifikace metod řešení

Z matematického hlediska je zadání obecné úlohy následující: Uvnitř oblasti V hledáme komplexní skalární funkci f , která vyhovuje následujícím rovnicím

$$L(f) = G, \quad (1)$$

$$\Lambda(f) = \Gamma, \quad (2)$$

kde rovnice (1) platí uvnitř oblasti V a rovnice (2) platí na hranici oblasti ∂V . L , Λ jsou pak lineární operátory a G , Γ zdrojové členy. Řešení této hraniční úlohy můžeme zapsat ve tvaru nekonečné sumy

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} a_n f_n, \quad (3)$$

kde f_n jsou zvolené funkce definované uvnitř objemu V , které tvoří báze funkce rozvoje. Hledáme pak koeficienty rozvoje a_n . V případě, že budeme hledat numerické řešení problému, pak to znamená, že hledáme pouze řešení přibližné. Znamená to tedy, že rozvoj (3) má jen konečný počet členů a k přesnému řešení se přiblížíme pouze s určitou přesností. Báze funkce rozvoje (3) nejsou u numerických metod řešením rovnic a ani nesplňují hraniční podmínku (2). Numerický způsob řešení proto bývá jediným způsobem (s výjimkou silné konvergence), jak řešit složité geometrie zkoumané oblasti nehomogenních prostředí a případně prostředí nelineárních [39].

1.3.2. PŘEHLED DOSTUPNÝCH NUMERICKÝCH METOD

Naprostá většina numerických metod, používaných v současné době pro řešení CEM⁴, je založena na Maxwellových rovnicích. Dle jejich tvaru můžeme rozdělit i příslušné domény, v jejichž rámci je výpočet realizován. Z tohoto rozdělení pak vyplývají čtyři základní výpočetní techniky, na nichž jsou tyto metody postaveny:

- FDDE - modely řešené ve frekvenční oblasti v diferenciálním tvaru,
- FDIE - modely řešené ve frekvenční oblasti v integrálním tvaru,
- TDDE - modely řešené v časové oblasti v diferenciálním tvaru,
- TDIE - modely řešené v časové oblasti v integrálním tvaru.

Každá z výše uvedených technik má své silné a slabé stránky, které přirozeně limitují i hranice využitelnosti, jež z využívané výpočetní techniky vyplývají.

Výhody integrálních technik můžeme spatřovat v přirozené redukci dimenze analyzovaného problému (z 3D problému na 2D problém při logicky nižším počtu elementů při výpočtu) a neomezeném prostoru, v němž se může analyzovaný objekt v rámci výpočtu nacházet. Na druhou stranu mají oproti diferenciálním technikám výrazně vyšší nároky na vlastní výpočet (hustá matice řešené soustavy) [40].

Silnou stránkou technik využívajících řešení v časové oblasti je oblast analýz širokopásmových problémů, přechodových a časově nelineárních dějů, či vlivu diskontinuit a chování odraženého pole v blízkém okolí objektu. Ve frekvenční oblasti naopak oblast analýz úzkopásmových problémů, úloh s extrémně dlouhými časovými odezvami, či modelů se silně frekvenčně závislými materiálovými vlastnostmi [40].

Obecné rozdělení optimální využitelnosti těchto metod v závislosti na oblasti řešeného problému a frekvenci je možné nalézt v následující tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1 – Rozdělení využití numerických metod FD a TD, převzato z [41]

Zkoumaný rozsah	10 kHz – 10 MHz	10 MHz – 100 MHz	100 MHz – 3 GHz
Vnější problém	FD	FD	TD
Vnitřní problém	FD	FD / TD	TD
Kabelové svazky	FD	TD	TD

Typické výhody a nevýhody uvedených výpočetních technik daly při řešení komplexních problémů vyniknout zejména následujícím numerickým metodám [42]:

- MoM (Momentová metoda),
- FEM (Metoda konečných elementů),
- FDTD / FIT (Metoda konečných diferencí / integrálů v časové oblasti),
- TLM (Metoda přenosových vedení),
- Hybridní a iterační metody (FDTD / FETD; FEM / MoM, FDTD/TLM).

⁴ CEM – Computational Electromagnetics - elektromagnetický problém řešený pomocí numerických metod.

MoM

Momentová metoda byla navržena a poprvé publikována v [43]. Jedná se o numerickou metodu, jež je založena na popisu analyzovaného problému v integrálním tvaru - nejčastěji FDIE, který v rámci řešení transformuje pomocí techniky vážených reziduí do maticového tvaru (lineární systém rovnic: $Z \cdot I = U$). Různé typy MoM metod se od sebe mohou lišit jak způsobem, jakým je tato transformace provedena (inverzní, eliminační apod.), tak i přístupem, jakým jsou dále tyto soustavy rovnic řešeny (např. pomocí přímých metod využívajících Gaussovy eliminace či LU dekompozice) viz [40] a [42].

Výstupem analyzovaného problému skrze tyto metody je aproximované rozložení proudů (resp. hustot náboje J), které protékají po povrchu jeho geometrie, jež je běžně reprezentována pomocí trojúhelníkových, či čtyřúhelníkových elementů, nebo jejich kombinace. Z toho pak vyplývá i většina dalších potenciálních rizik, která mohou hrát významnou roli v rámci jejich využití při analýze elektromagnetických polí.

Můžeme zmínit možné problémy se stabilitou výpočtu (iterativní metody), jejich silnou citlivost na kvalitu vytvořené sítě (hrany, apertury, realistická reprezentace rozložení náboje u vzájemně velmi blízkých částí konstrukce) a problémy s popisem objemových dielektrických těles (výpočetní nároky) [44]. Rovněž jsou známy problémy výpočetní metody spojené s nereálným popisem chování povrchových proudů uvnitř a vně vodivých dutin tvořených ideálním vodičem z důvodu vynucení nulového pole. Tyto problémy jsou způsobeny skutečností, že ne všechny formulace integrálních rovnic lze bez potíží aplikovat na obecné problémy [40].

Při vlastní aplikaci momentové metody se původní analytická rovnice převede na soustavu lineárních algebraických rovnic pro neznámé koeficienty v rozvoji hledané funkce [39]. Při řešení vycházíme z vlnové rovnice založené na 1., 2. a 4. Maxwellově rovnici. Následně na základě stanovení hraničních podmínek uspořádáme integrální rovnice a volíme báze funkce. Poté jsou sestaveny soustavy rovnic pro popis jednotlivých funkcí a tyto rovnice jsou převedeny na soustavu lineárních rovnic, které následně řešíme.

FEM

Úlohy řešené pomocí FEM metod jsou primárně popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic. Tato metoda může být s úspěchem uplatněna na uvažovanou problematiku předcertifikačních testů vozidel zejména z důvodu velmi přesné reprezentace složité struktury vozidla a jeho materiálových parametrů. Cenou za tento přesný popis jsou ovšem velmi vysoké nároky na výpočetní kapacitu i kvalitu použité sítě modelu. Výhodu pak můžeme spatřovat ve flexibilitě určení hranic zkoumaného problému – metoda se dá tak využít i v případě hybridních řešení (např. FEM - MoM) viz, [45], [46].

FDTD / FIT

Metoda FDTD je jednou z nejrozšířenějších numerických metod pro řešení různých otázek z oblasti elektromagnetického vlnění, zejména pro její jednoduchost a schopnost řešit téměř bez omezení nehomogenní média a materiály v modelu obsažené.

Numerické metody FDTD [47] a FIT [48],[49] jsou založeny na řešení diferenciálního a integrálního tvaru Maxwellových rovnic v časové oblasti. V rámci tohoto řešení je předem ohraničený prostor, ve kterém je analyzovaný objekt umístěn a reprezentován skrze svou prostorově a časově diskretizovanou podobu [50], [51].

Typickým znakem metody FDTD je tvar diskretizační buňky, která téměř vždy nabývá podoby pravoúhlého šestistěnu. Právě toto originální technické řešení umožňuje jednoduchý a elegantní přístup k výpočtu elektromagnetického pole. S tím je i logicky spojena nízká náročnost na výpočetní techniku a relativně vysoká rychlost výpočtu. Jako další výhody můžeme spatřovat možnost práce s materiály majícími nelineární či anizotropní vlastnosti [51], [52]. Nespornou výhodou je také možnost zapojení hybridních metod [53], s výhodami kombinujícími aspekty jednotlivých postupů.

Mezi často zmiňované problémy metody pak patří chybná, či nedostatečně přesná diskretizace numerického modelu, jasně vyplývající z přístupu, který metoda k této otázce volí. Dalším známým problémem jsou pak časové nestability výsledků z míst prostorového rozhraní mezi různými typy sítí [54].

TLM

Metoda TLM byla publikována poprvé v roce 1971 [55] jako postup řešení v časové oblasti emulující šíření vlny rozprostíráním a připojováním napěťových pulzů přes 3D přenosové vedení. Lokální pole každé elementární buňky je modelováno 12-ti portovým uzlem přenosového vedení. Existují různé formy této metody. Nejčastěji využívanou formou je Symmetrically Condensed Node (SCN) [56].

Pravděpodobně asi největší výhodou této metody je možné spatřovat v možnosti jejího relativně jednoduchého spojení s jinými výpočetními metodami, jako jsou například MoM, FDTD či FIT. Takovéto hybridní spojení mezi rychlým výpočtem chování elektromagnetického pole v ohraničeném prostoru a možností velmi přesné analýzy aktuálních poměrů na vedení, které tímto prostorem prochází, pak představuje jednu z nejvíce univerzálních cest, jak zevrubně a přesně analyzovat většinu vzniklých situací, na něž můžeme v oblasti EMC/EMI běžně narazit [40].

Přímé využití TLM metod je pak možné hledat především v rámci analýz různých přenosových vedení, jako jsou například kabelové svazky vedené nad zemní rovinou, či dobře vodivou konstrukcí.

1.4. MOŽNOSTI VALIDACE SIMULOVANÝCH A MĚŘENÝCH DAT

Validace numerických modelů je důležitou aktivitou zejména z důvodu stanovení důvěryhodnosti a spolehlivosti předpovídaných výsledků a jako pomoc při vývoji dalších strategií modelování. Ačkoli se na první pohled jedná o principiálně jednoduchý problém, validace může být v praxi velmi komplexní a komplikovanou disciplínou.

Naprostá většina nástrojů CEM využívá pro svou funkci Maxwellových rovnic v některé z jejich známých podob, přičemž jejich přesnost a míra shody záleží na rozsáhlém množství faktorů. Mezi tyto faktory zejména patří fyzikální podstata použitých rovnic (integrální nebo diferenciální tvar, časová nebo frekvenční oblast), zvolený způsob numerického řešení (plně vlnový, nebo částečně vlnový, způsob práce s maticemi), omezení plynoucí z inherentního modelu, aproximace a další. Formalizace fyzikálních problémů, dostupná primitivní data modelu (kanonický povrch nebo objemové objekty, vodiče, hrany, apod.), frekvenční rozsah analýzy, časová, nebo síťová diskretizace rovněž významně ovlivňují přesnost, shodu řešení, a tedy celkově obecnou platnost numerického modelu.

Experimentální ověřovací měření může být samo ve své podstatě považováno za model, který nevyhnutelně zahrnuje různé aproximace a předpoklady v interpretacích získaných výsledků. Navíc perfektní shoda měřených a simulovaných výsledků není plně dosažitelný cíl, neboť kritéria pro přijatelnou korelaci významně závisí na šíři a oblasti aplikace numerické simulace. V určitých případech mohou mít nejvyšší vypovídací hodnotu velikosti amplitud, v jiných případech to pak mohou být frekvence či rezonanční jevy. Proto v této oblasti existují požadavky na odvození hodnot, které reflektují různé aspekty výsledků. Techniky zaměřující se na adresaci těchto požadavků jsou proto integrální součástí výzkumu modelování EMC v oblasti automobilového průmyslu.

1.4.1. TRADIČNÍ TECHNIKY ANALÝZY

Obecným způsobem srovnávání souborů dat je vizuální porovnání sloužící k hodnocení shody mezi dvěma soubory dat. Tento přístup ovšem nabízí pouze subjektivní hodnocení kvality shody. Porovnávání velkého množství průběhů je velmi obtížné a bez podpory metody využívající kvantitativních hodnot pro vyjádření míry shody prakticky nerealizovatelné [57].

Mnohem častější je použití objektivnějšího přístupu využívajícího výpočtu úrovně chyby mezi dvěma výsledky. Tato se obvykle stanovuje v procentuálním vyjádření. Přes zjevnou jednoduchost dává toto řešení značně úzký pohled na korelaci a vyžaduje značnou pozornost při používání této techniky při průchodu získaných výsledků nulou [58].

Jiné kvantitativní přístupy zahrnují aplikaci korelačních funkcí [59], nebo modifikaci spolehlivostních faktorů (reliability factor) odvozených z prací publikovaných v jiných oborech [60]. Tyto techniky, ačkoliv jsou použitelné v řadě ohledů, stále zaostávají ve stupni flexibility nutném pro aplikaci různých validačních kritérií.

Další metodou posouzení míry korelace jsou tzv. korelogramy. Jejich princip spočívá v analýze korelačních dat získaných mezi dvěma porovnávanými křivkami, obvykle výsledky numerické simulace a externí reference. Tato korelace zprostředkovává tři pohledy, které mohou být použity k vyjádření celkové spolehlivosti modelu. Jsou to: maximální hodnota korelace, symetrie výsledného korelogramu a RMS (vážený průměr) rozdílu křížového korelogramu (Cross-corelogram) a auto-korelogramu (Auto-corelogram). Klíčovou vlastností korelogramů je skutečnost, že považují všechny části porovnávané křivky za stejně důležité, bez skrytého váhování amplitud rezonančních jevů, jejich pozice a chování systému mezi těmito jevy [61].

Metoda faktorů spolehlivosti (Reliability factors) zdůrazňuje oproti dříve zmíněným metodám více pozici rezonančního fenoménu v porovnávaných datech než jeho intenzitu. Ve snaze dodržet efektivně tuto premisu jsou brány v potaz zejména první derivace intenzit elektrického pole s respektem k jejich frekvenci. Faktory spolehlivosti rovněž využívají normalizaci integrálu intenzit přes daný frekvenční rozsah, ačkoliv tento přístup nemusí být vždy vhodný zejména pro porovnání rozptylových parametrů např. mikrovlnného zařízení, kde může být exaktní porovnání amplitud klíčové [61].

Z uvedené literatury tedy vyplývá, že existuje množství přístupů umožňujících určitou formou srovnat dva soubory dat získaných odlišnými způsoby. Jako nejperspektivnější z výše jmenovaných se jeví princip faktorů spolehlivosti, který respektuje více pohledů na sledovanou oblast: při analýze frekvenční závislosti intenzity elektrického pole tato metoda nezkoumá pouze exaktní velikost amplitudy intenzity pole, ale spíše její polohu ve frekvenčním pásmu.

Patrně nejkomplexnější metodou kombinující předešlé postupy (zejména přístup k objektivnosti posouzení shody a analýza amplitudových a frekvenčních fenoménů) je Feature Selective Validation – FSV. Metoda využívá k porovnání dvou setů dat (obvykle numerická simulace a měření) dekompozici dat do dvou složek – trendu a typických znaků (features). Data trendu jsou zobrazena jako nízkofrekvenční část, zatímco typické znaky, nebo rychlé změny jako vysokofrekvenční část. Analýzou nízkofrekvenční části získáme vyhodnocení podobnosti trendu (amplitude difference measure - ADM). Analýzou vysokofrekvenční části obou setů dat pak podobnost typických znaků (feature difference measure - FDM). Tyto části mohou být pak kombinovány do hodnoty celkové shody (global difference measure - GDM). Hlavní síla metody FSV spočívá v možnosti analýzy dat bod po bodu, jasně ukazující, která část dat působí případný důvod neshody a také využití vlastních deskriptorů (6 stupňů od „excellent“ do „very poor“) [62].

Tento přístup se jeví jako velmi slibný, neboť máme možnost porovnat zvlášť průběh shody trendu a jednotlivých rezonančních fenoménů. To je zvláště výhodné, neboť v praxi nemůžeme prozatím očekávat, že při porovnávání výsledků numerické simulace s měřenými daty získáme vysokou shodu intenzity pole v rezanci, ale spíše jeho polohu ve frekvenčním pásmu. Budeme se proto dále zabývat vhodnou aplikací metody FSV, která dokáže kvalitativně srovnat dvojici výsledků s důrazem na popis výskytu než jeho exaktní hodnotu. Více se metodě FSV věnuje kapitola 1.4.3.

1.4.2. ASPEKTY PROCESU VALIDACE DAT

Validační proces pro porovnání výsledků měření a simulací je přímo závislý na tom, co je validováno a jaká data jsou k validaci dostupná. **Preferovaným postupem je validovat neznámý výsledek vůči známé referenci** [62]. Pokud není možno získat žádné spolehlivé reference, je možné provést validaci pomocí auto-referenční metody. Ačkoliv se jedná o způsob méně vypovídající, tento přístup stále umožňuje dosáhnout vysokého stupně důvěry ve validaci modelu oproti stavu, kdy není validace provedena vůbec. Obrázek (Obr. 4) popisuje schéma vedoucí k validaci souborů dat, zde s využitím metody FSV, zmíněné v kapitole 1.4.3.

Úrovně validace modelu

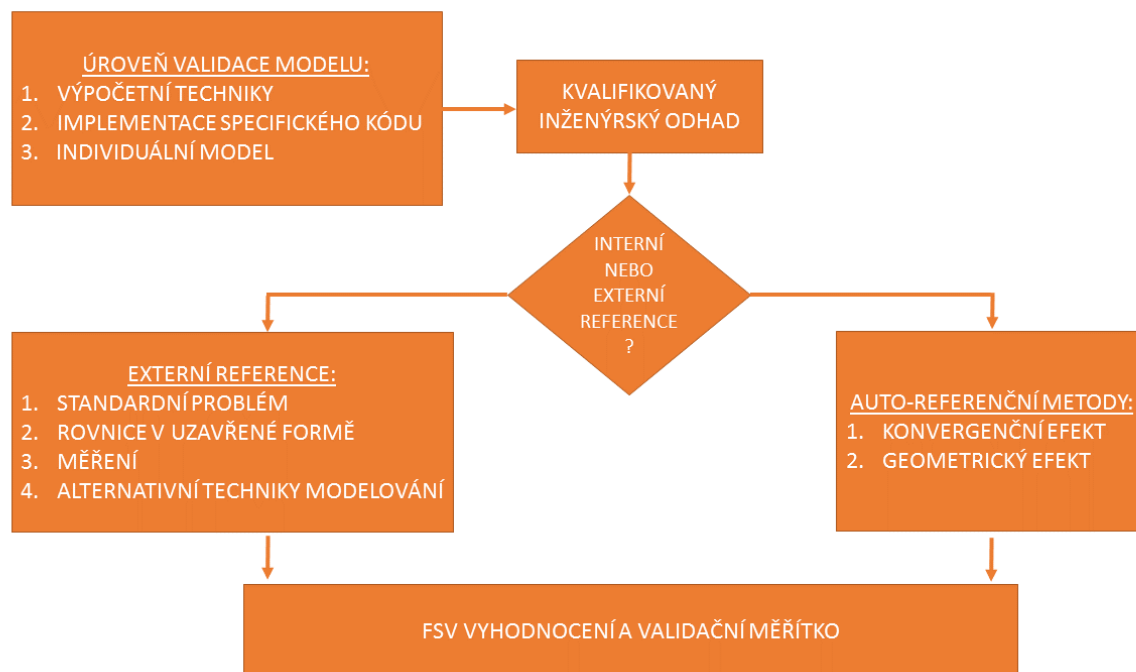
Obecně můžeme rozlišit mezi třemi úrovněmi provedené validace modelu. Pokud se rozhodujeme, jakým způsobem budeme provádět validaci modelu, je důležité uvažovat, jaká úroveň validace je skutečně nezbytná. Dle obrázku (Obr. 4) můžeme rozdělit úrovně následujícím způsobem:

- 1) matematická úroveň: výpočetní forma validace,
- 2) implementační úroveň: implementace individuálního programového kódu,
- 3) úroveň modelu: specifická validace.

První úrovní validace modelu je výpočetní (resp. numerická) metoda. Ve velkém množství případů EM modelování není tato validace nezbytná, neboť vlastní výpočetní metoda byla již předmětem experimentální validace v době svého vývoje.

Druhou úrovní validace je ověření věrohodnosti softwarové implementace výpočetní metody a zajištění tvorby správných výsledků pro definovaný model. Je velmi vhodné testovat individuální SW řešení vůči různým typům problémů, pro které má být řešení určeno. Cílem takového ověření by mělo být odhalení vlastností daného postupu tak, aby jasně odhalil slabé i silné stránky zvoleného SW řešení.

Třetí úroveň je validace specifických problémů týkajících se nejčastěji inženýrských řešení. Ve velkém množství případů poskytují komerční SW nástroje dostatečně přesné výsledky odpovídající hledaným problémům. Potíž ovšem nastává ve správnosti definice problému, který uživatel řeší. Nejčastějšími chybami bývají příliš velké zjednodušení řešeného problému, nesprávnost odhadu materiálových parametrů a struktur, chybná volba prostředí a okrajových podmínek. Simulační nástroj pak i přes formální správnost řešení dodá výsledky, které se nemohou blížit reálným podmínkám.



Obr. 4 – Metody validace modelu dle interní či externí reference, převzato z [62].

Kvalifikovaný inženýrský odhad posuzovaného problému je velmi důležitým prvkem pro včasné rozpoznání nekonzistentnosti výsledků získaných numerickou metodou oproti reálným výsledkům. Zde můžeme shrnout základní poznatky, ke kterým by mělo být při validaci tímto způsobem přihlédnuto:

- a) Některé simulační techniky (nejčastěji MoM a PEEC⁵) jsou založeny na výpočtu proudů skrze celou strukturu. Vyzářená elektrická pole jsou pak stanovována na základě této proudové distribuce - tyto proudy zprostředkují významný pohled na platnost získaných výsledků. Ověřením proudové distribuce na specifických frekvencích (obvykle blízko rezonance) můžeme zjistit výskyt stojatého vlnění, chování proudů v nenavazujících oblastech a mezerách na vodivých površích. **Proudy by neměly být významně proměnné na sousedících segmentech a měly by se blížit k nule na koncích vedení a ploch** [63]. Pokud nejsou tyto základní vlastnosti splněny, indikuje to problém s numerickým modelem.
- b) V případě použití simulačních metod v časové oblasti (nejčastěji FDTD a TLM) jsou pole, proudy, nebo napětí stanoveny pro všechny buňky modelu pomocí numerické metody pro každý časový okamžik. Výsledkem je pak nejčastěji intenzita pole v určitém místě modelu. Proto ověření rozložení pole, proudů, nebo

⁵ Metoda pro řešení obvodových problémů v oblasti modelování elektromagnetických vlastností (Partial Element Equivalent Circuit method).

napětí šířících se výpočetní doménou může zprostředkovat dobrý pohled na platnost a realnost výsledků získaných numerickou metodou.

- c) Pokud sledujeme pole pomocí simulačních technik FDTD a TLM, je velmi vhodné pozorovat animaci rozložení pole umožňující zjistit, že nedochází k odrazu pole od výpočetní podmínky, pole se šíří všemi body pozorování a všechny rezonance byly již utlumeny, což indikuje kompletnost simulace. Jednoduché pozorování celkových výsledků pouze v určitém místě totiž není zárukou, že všechny nastalé efekty byly správně simulovány.
- d) Simulační techniky v časové oblasti jsou založeny na analýze proudů, respektive napětí (PEEC, resp. TLM) a jsou velmi vhodné zvláště pro analýzu desek plošných spojů. Animace proudů a napětí mohou být výhodně využity k pozorování správné propagace signálů po zamýšlené cestě a nečekaná odchylka od vedení proudu v dané trase desky plošných spojů (DPS) může být signálem nedokonalého, či jinak poškozeného modelu.
- e) Za určitých okolností je možné použít obecně známé parametry k validaci modelu. Například vyzařovací diagram půlvlnného dipólu je velmi dobře známý parametr, a pokud je zkoumaný model porovnatelný s tímto dipólem, může i toto jednoduché porovnání zvýšit důvěryhodnost primárního modelu.

Jakmile jsou definovány výsledky určené pro validaci, je nezbytné zvolit správnou referenční validační metodu. Pokud je to možné, kompletní řešení by mělo být porovnáno s externí referencí. V případě, že není možno provést srovnání, je nezbytné ověřit přesnost modelu skrze jiné autokorelační metody zahrnující konvergenční efekty a známé změny geometrie.

Dle obrázku (Obr. 4) můžeme provést validaci pomocí externích referencí následujícími způsoby:

- 1) srovnáním se standardním problémem,
- 2) řešením rovnice v uzavřené formě,
- 3) měřením,
- 4) jinými technikami modelování.

Volba správného zdroje reference je rozhodující pro správnost validace výsledku.

Cílem je využití metody s co nejvyšší dosažitelnou přesností [63].

V poslední době bylo publikováno množství publikací [64], [65], [66] a [67] určených zejména pro širokou inženýrskou společnost k validaci výstupů SW nástrojů v typických současných problémech. Velké množství těchto řešení standardních problémů je také k dispozici na stránce IEEE EMC Society's Modeling Web [68]. Vlastní ověření probíhá srovnáním vlastních výsledků s uznávanými výsledky standardního problému pomocí dále uvedených metod.

Výběr reprezentativního příkladu pro použití rovnic v uzavřeném tvaru musí být proveden citlivě. Hlavním úkolem je nalezení dostatečně jednoduché geometrie, kterou mohou rovnice v uzavřeném tvaru ještě vhodným způsobem popsat. Například přesná simulace odrazu od perfektně vodivé koule může dosáhnout dobrých výsledků, ovšem neposkytuje žádnou záruku, že takto dobrých výsledků bude dosaženo obdobným postupem i odrazem od komplexních předmětů. Rovnice v uzavřeném tvaru jsou obecně

velmi specializované a neměly by reprezentovat reálný problém, ale pouze úzce vybranou situaci, kterou dokáží dostatečným způsobem postihnout.

V případě, že jako validační metoda bude použito ověřovací měření, měla by být zajištěna co nejnížší nejistota tohoto měření. Kalibrace antén, sond výkonu a útlumy vodičů musí být zajištěny s co nejvyšší přesností. Překážkou tohoto požadavku je, že běžné vybavení, používané pro účely EMC, má nejistotu měření běžně kolem 6 dB. Je proto nezbytné zajistit optimální vybavení a zajistit splnění následujících bodů:

- 1) geometrie měřicího prostředí (model + okolní podmínky) musí být přesně reprezentována v numerickém modelu,
- 2) musí být důkladně prozkoumána a zajištěna celková přesnost měření,
- 3) musí být zahrnuty impedanční efekty a přechodné jevy.

V praxi jsou nejčastěji používanou externí referencí pro validaci EMC modelů skutečná měření. To je způsobeno tím, že problémy EMC typicky nevedou k řešení v uzavřené formě rovnic. Testovací prostředí (běžně OATS⁶ nebo stíněná komora), výška zkušební antény, její vyzařovací diagram mají velmi významný vliv na měření a pokud nejsou dobře popsány i v simulaci, vedou ke zcela rozdílným výsledkům nepoužitelným pro ověření míry relevance modelu. Více informací k problematice těchto měření uvádí [62] nebo [63].

Shoda mezi výsledky simulace a výsledky měření nemůže být větší než nejistota měřicího pracoviště. Pokud naměřená data nesouhlasí s výsledky numerických simulací, měla by být pozornost věnována skutečnosti, že nesprávné jsou spíše výsledky měření než výsledky numerické simulace. Je chybou vytvořit předsudek, že při neshodě výsledků je chybná numerická metoda. V potaz by měla být brána spíše skutečnost, že reálné vlastnosti, které se přímo promítly do výsledků měření, nebyly dostatečným způsobem popsány jako vstupní podmínky numerické simulace a způsobily tak neočekávané výsledky, které nemohou být navzájem porovnávány.

Není-li možno provést validaci pomocí externí, nebo nezávislé reference, je nezbytné použít auto-referenci. Auto-referenční model (sekundární model) by měl být vytvořen stejným způsobem jako model primární, pro který byla provedena numerická simulace řešící zadaný problém. Pro snížení míry nejistoty se doporučuje použít alespoň dvě varianty změn tohoto sekundárního modelu, na kterých bude zkoumána shoda s modelem primárním. Existují základní pravidla reflektující tento princip:

- 1) změny by neměly zásadním způsobem ovlivnit výsledek numerické simulace,
- 2) musí být aplikovány takové změny, jejichž efekt na řešení je dopředu znám.

V reálných podmínkách se pak jedná o změny aplikované do dvou základních oblastí:

a) Konvergenční efekty

- 1) Úpravy sítě, segmentů, velikosti buněk,
- 2) Bílá místa ve výpočetní doméně (nedefinované oblasti),
- 3) Absorbující okrajové podmínky.

⁶ OATS – Open Area Test Site – testovací místo ve volném prostoru s definovanou velikostí a parametry.

b) Geometrické efekty

- 1) Velikost apertur,
- 2) Počet apertur,
- 3) Rozmístění komponent na DPS (aplikace principů toleranční analýzy).

Výsledky z primárního a sekundárního modelu jsou následně zkoumány pomocí metody FSV, diskutované dále.

Z výše uvedeného vyplývá, že validace výsledků získaných numerickou metodou je možno dosáhnout dvěma různými základními způsoby. Jedná se o externí reference, nebo o auto-referenční metody. Externí reference tvoří významně spolehlivější zdroj validačních dat, v oblasti EMC se z této oblasti nejčastěji uplatňuje validační měření. Řešené EMC problémy totiž vedou pouze výjimečně k metodám umožňujícím použití rovnic v uzavřené formě, či validaci pomocí standardního problému. Externí validace nemusí být ovšem vždy dostupná. V těchto případech je velmi vhodné využít auto-validační metody založené na tvorbě modifikovaného sekundárního modelu s dopředu známým vlivem změn na celkový výsledek. V rámci návrhu vhodných předcertifikačních metod budeme na základě těchto poznatků primárně využívat externí reference získané pomocí validačního měření, okrajově pak tvorbu sekundárního modelu.

1.4.3. FSV

FSV je moderní, velmi účinná a objektivní metoda, zvláště vhodná pro ověření korelace dat získaných pomocí CEM metod a validačního měření. Primárně byla publikována v [69], [70], [71] a řadou dalších autorů validována a rozšiřována. Základní motivací pro aplikaci této metody do technické praxe je snaha kvantifikovat:

- 1) Opakovatelnost měření (stejné měření, se stejnou obsluhou ve stejné laboratoři),
- 2) Přenositelnost měření (realizace stejného měření v jiné laboratoři),
- 3) Vliv obsluhy (vliv různých obsluhujících osob na výsledek stejného měření),
- 4) Variace metody (efekt velkých, resp. malých změn na konfiguraci testu).

Základem techniky FSV je rozklad porovnávaných výsledků do dvou komponent a následná rekombinace výsledků k získání přehledu o celkové shodě. Použité komponenty jsou Amplitude Difference Measure (ADM), která porovnává amplitudy a trendy jednotlivých datových sad, a Feature Difference Measure (FDM), která porovnává rychle proměnné znaky (jako funkce nezávislé proměnné) těchto sad. ADM a FDM jsou následně kombinovány do formy GDM. Všechny komponenty ADM, FDM a GDM jsou použitelné jako analýza prováděná bod po bodu, nebo jako jednotlivé globální měření [70].

Způsob řešení FSV vychází z postupu prezentovaného v[62], jeho zjednodušený princip je následující:

- 1) Odhad oblasti překryvu porovnávaných datových setů a zanedbání všech hodnot nacházejících se mimo okno odhadu. Důvodem je zbytečná extrapolace nerelevantních dat.
- 2) Převzorkování dat na nejnižší bod hustoty tak, aby data z obou porovnávaných datových setů byla koincidentní.
- 3) Filtrace dat do tří rozsahů. Toho je dosaženo pomocí Fourierovy transformace – „DC“ set je tvořen stejnosměrnou složkou a čtyřmi nejnižšími datovými body.

Oblast „Lo“ je tvořena následujícími body do oblasti aproximace, které náleží 40 % celkové plochy transformované křivky. Oblasti „Hi“ náleží vše ostatní. Zjednodušeně můžeme říci, že na data byly aplikovány filtry typu dolní propust v případě „DC“, pásmová propust v případě „Lo“ a horní propust v případě „Hi“ oblastí. Tyto oblasti jsou následně zpět transformovány do původní domény.

- 4) Vytvoření Amplitude Difference Measure (ADM) z normalizované difference DC dat. ADM je definováno výrazem (4), kde Lo_1 a Lo_2 jsou komponenty původních dat po průchodu filtrem typu dolní propust a n je celkový počet uvažovaných datových bodů.
- 5) Vytvoření Feature Difference Measure (FDM) z normalizované difference kombinace derivací dat po průchodu pásmovou a horní propustí dle výrazu (5). Kombinací (6) ADM a FDM získáme Global Difference Measure (GDM). Měřítko ADM, FDM a GDM pak mohou být převedena do slovních popisů dle tabulky (Tabulka 2).
- 6) Výpočet podílu rozdílových hodnot (bod po bodu) spadajících do kategorií uvedených v tabulce (Tabulka 2) a tvorba histogramu. Tyto histogramy jsou obvykle používány v inženýrské praxi k hodnocení míry shody.

$$ADM(f) = \left| \frac{\alpha}{\beta} \right| + \left| \frac{\chi}{\delta} \right| e^{\left| \frac{\chi}{\delta} \right|} \quad (4)$$

$$FDM(f) = 2(|FDM_1(f) + FDM_2(f) + FDM_3(f)|) \quad (5)$$

$$GDM = \sqrt{ADM(f)^2 + FDM(f)^2}, \quad (6)$$

kde

$$\alpha = (|Lo_1(n)| - |Lo_2(n)|) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [|Lo_1(i)| + |Lo_2(i)|] \quad (8)$$

$$\chi = (|DC_1(n)| - |DC_2(n)|) \quad (9)$$

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [|DC_1(i)| + |DC_2(i)|] \quad (10)$$

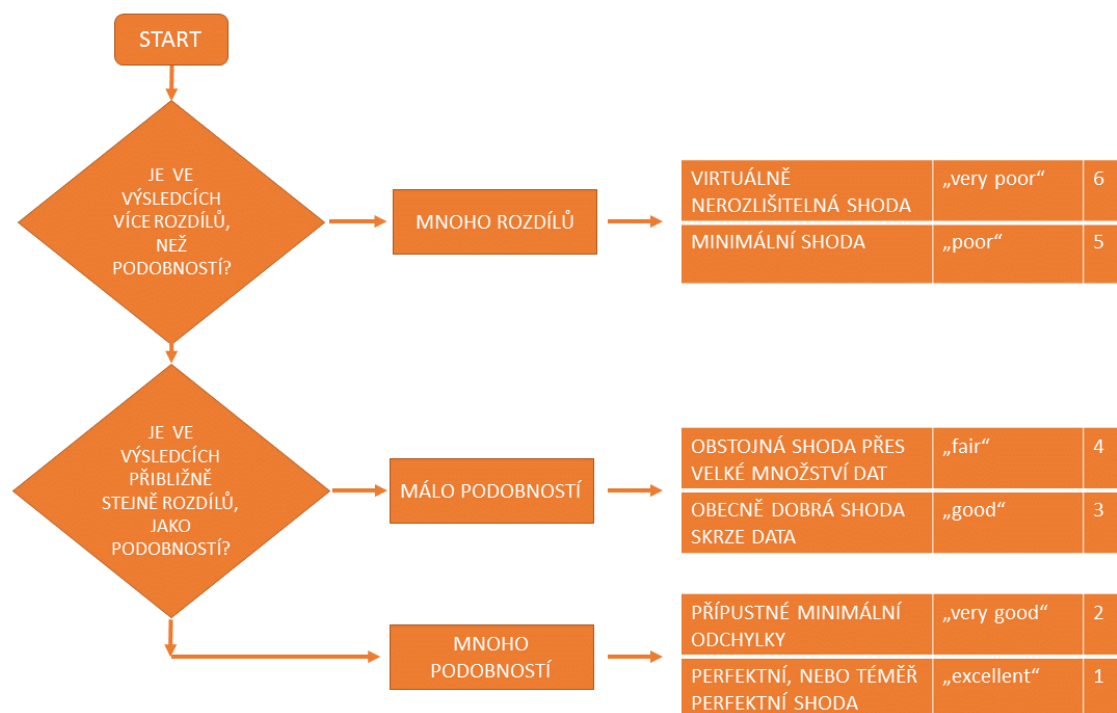
a FDM_1, FDM_2, FDM_3 jsou prvky inverzní transformace Hi a Lo průchodů. Detailní odvození vztahů lze nalézt v [71] a [72].

Výpočtem FSV získáme vztah mezi numerickým výstupem a jeho rozprostřením jednotlivých kategorií, přičemž počty bodů validovaných dat umístěných v jednotlivých kategoriích můžeme s výhodou vyjádřit pomocí histogramu. V tabulce (Tabulka 2) můžeme vidět interpretační měřítko zachycující po kvantitativní a kvalitativní stránce hodnoty FSV, kterých může tato metoda nabývat.

Tabulka 2 – interpretační měřítko FSV

Hodnota FSV (kvantitativní)	FSV interpretace (kvalitativní)
Méně než 0,1	„Excellent“
Mezi 0,1 a 0,2	„Very good“
Mezi 0,2 a 0,4	„Good“
Mezi 0,4 a 0,8	„Fair“
Mezi 0,8 a 1,6	„Poor“
Větší než 1,6	„Very poor“

Validation Rating Scale (VRS) zajišťuje objektivní hodnocení shody a umožňuje vizuální porovnání mezi experimentálními a simulovanými daty (případně dvěma jinými datovými sety). Tato technika zprostředkovává analýzu s celkovým kvantitativním měřením podobnosti. Účel VRS je dvojitý: zaprvé umožňuje vizuálně porovnat shodu výsledků v jednotném rámci, zadruhé pak umožňuje přeložení výstupu FSV zpět do vizuálního rámce [72]. VSR využívá pro hodnocení šestibodové měřítko, vyžadující v každém uzlu pouze binární rozhodnutí tak, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5 – VRS pro vizuální hodnocení shody dat, převzato z [62].

Technika FSV odbourává subjektivitu při validaci jednotlivých datových setů jasným vedením způsobu analýzy při porovnání těchto dat. Je také použit kvantitativní jazyk deskriptorů alokovaných v hodnotách VSR. Jedná se o deskriptory „excellent“, „very good“, „good“, „fair“, „poor“, and „very poor“, odrážející všeobecně vnímaný lexikální pohled na shodu dat.

Z technické praxe vyplývá, že pro objektivní validaci dat v oblasti elektromagnetismu je nezbytné mít možnost porovnávat velikost amplitudy, frekvence, činitele jakosti a trend dat [73]. Technika FSV umožňuje objektivně numericky, případně pomocí pevně definovaného binárního postupu, stanovit dva základní úhly pohledu na shodu porovnávaných dat. AMD porovnáva amplitudy a trendy jednotlivých datových sad, FDM pak rychle proměnné znaky (jako funkce nezávislé proměnné) těchto datových sad. Globální výsledek GDM je pak tvořen příspěvky obou těchto komponent.

Metoda FSV se díky možnosti validace dat bod po bodu a zároveň zachování celkového přehledu nad shodou jeví jako zvláště vhodná pro validaci dat v rámci této práce. Data získaná pomocí zde navrhovaných předcertifikačních metod musí být objektivním způsobem ověřena, s cílem vyvodit závěry o použitelnosti a spolehlivosti zde prezentovaných metod, což tato zkoumaná metoda bez pochyby nabízí.

1.5. CÍLE DISERTACE

Na základě poznatků z dosavadního vývoje problematiky stanovujeme jako hlavní cíl této práce navrhnout a validovat postup provedení předcertifikačních zkoušek osobního automobilu. Aby bylo možno tento cíl naplnit, je nezbytné realizovat následující dílčí cíle této disertační práce. V každém z nich spatřujeme vlastní disertabilní přínos autora, jak je popsáno dále:

1. Vyvinout korektní numerický elektromagnetický model automobilu.
2. Definovat způsoby lokalizace rezonančních maxim v karoserii vozu pomocí numerické simulace.
3. Navrhnout metodiky měření intenzit elektromagnetických polí a předložit návrh předcertifikačního pracoviště pro zkoušky elektromagnetické odolnosti.
4. Provést certifikační měření a numerický model na základě jeho výsledků kalibrovat. Na základě výsledků stanovit komplexní doporučení pro provedení předcertifikační zkoušky.

Ad 1.

Pro volbu správné testovací metodiky potřebujeme znát jak spolehlivost a přesnost numerických modelů, tak i vlastní výsledky ze srovnávacích měření. Numerický model určený pro simulace elektromagnetické odolnosti může obsahovat velké množství detailů, které ovšem musí být z důvodu velké výpočetní náročnosti zjednodušeny. Hlavní disertabilní přínos autora pak můžeme spatřovat ve vývoji a následném ověření účinné, ale přesto dostatečně obecné metody zjednodušení modelu. Jedná se zejména o zkoumání vlivu kovových výtuh vnitřního vybavení vozu, jako jsou sedačky, nosník palubní desky,

volant a výztuha systému infotainmentu na vznik a případný posun rezonancí uvnitř karoserie vozu během ozařování vozidla intenzivním elektromagnetickým polem.

Ad 2.

V karoseriích vozů vznikají při ozáření elektromagnetickým polem rezonance. Vlivem umístění různých prvků v interiéru vozu společně s kovovou karoserií dochází ke vzniku prostorově vymezených míst s velmi vysokou intenzitou elektrického pole. Pokud se právě v místě tohoto maxima nachází trasa svazku palubní sítě, nebo přímo jedna z řídicích jednotek, jsou tyto prvky vystaveny extrémnímu namáhání z hlediska elektromagnetické odolnosti. Pro určení těchto maxim je nezbytné provést analytickou i numerickou analýzu a následnou lokalizaci hlavních kmiten rezonátoru, ke kterému můžeme karoserii vozu s výhodou přirovnat.

Na základě těchto poznatků je možno provést s vhodně definovaným modelem karoserie numerickou simulaci jednoznačně určující riziková místa v karoserii automobilu včetně vhodného výběru oblasti testování. Vlastní přínos autora je zřejmý v oblasti hledání maxim elektrického pole a jeho závislosti na umístění prvků vnitřního vybavení vozu. Při řešení této otázky je přítomna velká řada neznámých: konfigurace jednotlivých výbav vozů, modifikace řídicích jednotek, ale i nepřesnost počítačových modelů a výpočetních jader. Závěrečným cílem této stěžejní části práce bude komplexní postup a doporučení, jakým způsobem provést simulaci vozu, aby odchylky od následných reálných měření byly co nejvíce potlačeny.

Ad 3.

Druhou možností provádění předcertifikačních zkoušek jsou předcertifikační měření založená na modifikaci dostupných měřicích metod. Výsledky těchto předcertifikačních měření je pak možno využít jak pro tvorbu vlastních závěrů, tak jako referenční data pro ověření výstupů numerických simulací.

Pokud mají být výsledky simulací experimentálně ověřeny měřeními, je nutné stanovit jednotné podmínky pro tento úkon. Přínos autora v této části práce spočívá ve validaci standardizovaných měřicích postupů za účelem jejich modifikace pro použití jako předcertifikační metody. Navržené měřicí metody musí spolehlivě ověřovat výsledky simulací a musí být též dostatečně obecné, aby je bylo možno použít na různé typy vozů.

Ad 4.

Na základě realizace certifikačních měření a jeho objektivního porovnání s výsledky numerické simulace a předcertifikačního měření můžeme provést celkovou verifikaci zde navrhovaných předcertifikačních metod. Získané výsledky mohou rovněž posloužit k případné kalibraci numerického modelu za účelem jeho dalšího zpřesňování.

2. NUMERICKÉ SIMULACE VYBRANÝCH PROBLÉMŮ

Tato kapitola se věnuje problematice řešení předcertifikačních testů pomocí numerických simulací. Nejprve jsou zde v kapitole 2.1 popsány základní aspekty problematiky a následně v kapitole 2.2 verifikovány vybrané numerické metody pomocí standardního problému. V kapitole 2.3 jsou rozebírány metody přípravy numerických modelů pro simulaci, včetně úskalí, která jsou s touto problematikou spojena. V kapitole 2.4 je zevrubně diskutována problematika zjednodušení numerického modelu a vlivu zanedbání jeho jednotlivých částí na rozložení zkoumaného elektrického pole. Kapitola 2.5 se zabývá analýzou vlivu pozice zdroje testovacího pole za účelem výběru nejvhodnější metody. Konečně v kapitole 2.6 jsou shrnuty poznatky z předchozích kapitol a stanovena jednoznačná doporučení pro realizaci předcertifikačních simulací elektromagnetické odolnosti na vozidlech. Na základě těchto doporučení je provedena a diskutována ukázková numerická simulace kompletního vozidla.

2.1. ZÁKLADNÍ ASPEKTY NUMERICKÝCH SIMULACÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Složitě systémy vyžadují odpovídající přístup ke kvalifikovanému odhadu jejich chování z pohledu EMC – automobilovou problematiku nevyjímaje. Prvním krokem takového přístupu je stanovení cílů, které chceme numerickou simulací získat. Praktické poznatky ukazují, že by se mělo jednat o témata umožňující získat celkový přehled nad chováním vozidla z hlediska elektromagnetické odolnosti.

- 1) Analýza vnitřního prostředí karoserie, včetně modální analýzy. Cílem tohoto zkoumání je poznat rozložení intenzity elektrického pole ve vnitřních dutinách karoserie za účelem identifikace rizikových míst. V rámci této analýzy musí být rovněž rozpoznány vlastní rezonanční frekvence této dutiny a provedeno primární stanovení maximálních intenzit polí vznikajících uvnitř karoserie.
- 2) Analýza chování kabelových svazků. V rámci této analýzy je nutno prověřit vzájemný přeslech mezi jednotlivými vodiči v kabelovém svazku, zvláště v situaci, kdy se v jednom svazku potkávají zatížené silové vodiče a vodiče signální. Rovněž musí být prověřen důsledek expozice svazků vůči vnějšímu poli a analýza jevů z toho plynoucích.
- 3) Analýza zemního konceptu vozidla. Analýza zemních bodů je důležitá z hlediska rozložení proudů tekoucích po vodivé karoserii vozidla a případných problémů plynoucích z jejich nevhodného umístění. Důležité je též posouzení maximální délky zemních vodičů a společných tras s jinými signálovými, či silovými vodiči.

- 4) Analýza anténních prvků. Vozidlo v dnešní době disponuje velkou řadou antén pro různá pásma. Z hlediska elektromagnetické odolnosti jsou tyto antény a zejména jejich impedanční členy vystaveny extrémní zátěži, na kterou musí být vhodně dimenzovány. V rámci analýzy tak musíme stanovit alespoň orientační požadavky na jejich selektivitu, strmost vstupních filtrů a maximální přetížitelnost.

Pokud budou výše uvedené analýzy provedeny společně na jediném modelu, numerické řešení nebude dosahovat uspokojivých výsledků. Proto je nezbytné celý simulovaný systém rozdělit na jednotlivé funkční části. Každá tato část pak vyžaduje model reflektující všechny jeho důležité parametry, ovšem při zachování optimální náročnosti výpočtu a zanedbání nerelevantních detailů. V našem případě bychom se měli z tohoto pohledu zaměřit na čtyři hlavní části, které je nutno pro účely numerické simulace dobře popsat a následně analyzovat vhodnou numerickou metodou:

- 1) karoserie vozu a její jednotlivé části,
- 2) kabelové svazky,
- 3) modely řídicích jednotek,
- 4) antény včetně impedančních členů.

2.1.1. UVAŽOVANÉ VÝPOČETNÍ METODY

V kapitole 1.3.2 byly popsány v současnosti dostupné numerické metody vhodné pro řešení problémů v oblasti automobilové EMC. Není v silách autora této práce, ani v možnostech společnosti ŠKODA AUTO a.s., aktivně používat veškeré zde zmíněné metody a postupy. Pro unifikaci řešení problémů z oblasti EMC je v koncernu VW standardně využíván komplexní nástroj EMC Studio[74], disponující řadou modulů pro řešení této problematiky. Jednotlivé moduly pak pokrývají následující problematiku:

- 1) elektrostatické problémy,
- 2) vazby mezi příjemci a zdroji rušení,
- 3) odolnost vůči vnějším elektromagnetickým polím,
- 4) typické laboratorní konfigurace pro komponentní zkoušky (ESA).

Nástroj EMC Studio rovněž umožňuje expertní analýzu celých vozidel (kontrola dodržení návrhových standardů) a pokročilou práci s numerickými modely (tvorba vlastní sítě a její úpravy).

EMC Studio, verze 8.1, využívá pro svoji funkci Method of Moments (MoM), Method of Auxiliary Sources (MAS) [75], [76], [77] Transmission Line Method (TLM) a síťovou analýzu (řešiče SPICE/PSPICE/HSPICE nebo DOLPHIN-SMASH VHDL-AMS). Pro řešení výše uvedené problematiky budeme tedy používat tento nástroj a metody v něm obsažené. Získané výsledky pak budou verifikovány pomocí CST MWS (licence VUT Brno) a analytických výpočtů.

3D řešič pole (TriD) založený na MoM je základní součástí programového balíku EMC Studio. Umožňuje analýzu proudů na vodivých strukturách sestávajících z různě tvarovaných křivek a povrchů (v obou případech otevřených i uzavřených). Program umožňuje pracovat s konečnou vodivostí drátových segmentů, specifikací jejich rezistivity, indukčnosti a kapacity, včetně jejich frekvenčních závislostí. Pro simulace zátěží je možno použít komplexní impedance, rovněž frekvenčně závislé. Libovolný lineární, časově neproměnný pasivní obvod, může být zahrnut do výpočtu pomocí

jedinečného SPICE odkazu – vazby. Dále jsou k dispozici různé typy budících zdrojů, zahrnující rovinnou vlnu, napěťové zdroje přes drátové segmenty, proudové zdroje, vyzářené proudy a elektrické i magnetické dipóly. K dispozici jsou i vzájemné kombinace výše uvedených zdrojů. Tyto zdroje mohou pracovat jak ve frekvenční, tak i v časové oblasti.

Pro výpočet vlastností vozových kabelových svazků je nutností implementovat je ve výpočetním postupu MTL (Multi conductor transmission line). 2D LC parametry jimi získané musí být zahrnuty pro správný výpočet parametrů izolace vodičů použitých ve svazku. Pro výpočet LC parametrů je použita metoda MAS (Method of Auxiliary Sources) [78], [79] a MoM se speciální adaptivní diskretizací geometrie. Použitý hybridní přístup využívá výhody obou metod. Znalost chování statického pole, která je využita při fázi pre-processingu, zabrání příliš vysokému počtu iterací, které jsou běžně potřeba při využití adaptivní FEM metody (ve snaze dosáhnout uvažované přesnosti). Zvláštností cross-talk problémů vozidlových svazků je přítomnost vodičů s velice malým průřezem (0,3 – 0,6 mm). Tyto vodiče jsou umístěny velmi blízko k vodivému povrchu karoserie v délce 1 – 3 m s velkým počtem ostrých hran způsobujících, že FEM generuje velmi vysoké množství pomocných sítí (opět ve snaze dosáhnout uvažované přesnosti výpočtu).

2.2. VERIFIKACE DOSTUPNÝCH VÝPOČETNÍCH METOD

Pro ověření správnosti výpočtu chování složitých struktur pomocí zvolených numerických metod považujeme za nezbytné nejdříve prověřit jejich spolehlivost na jednoduchých, a tedy nezávisle ověřitelných modelech – viz verifikace pomocí standardního problému (kapitola 1.4.2). Jako předmět zkoumání stanovíme primární problém automobilové EMC, a to rozložení intenzity elektrického pole uvnitř karoserie vozidla. V této kapitole budou nejdříve diskutovány teoretické aspekty, které mají zásadní vliv na změnu vlastních rezonančních frekvencí tohoto dutinového rezonátoru, za který můžeme díky specifickému chování vnitřní prostor automobilu považovat.

Následně bude popsán navržený testovací model, na kterém budeme testovat míru shody analytického výpočtu s dvojicí ověřovaných numerických metod: MoM aplikované v prostředí EMC Studia, jako primární testovací metody a FDTD v prostředí CST MWS jako ověřovací testovací metody.

2.2.1. ANALYTICKÝ VÝPOČET REZONANČNÍCH FREKVENCÍ

Vlastní rezonanční frekvence rezonátoru, kvalita rezonátoru a zejména změna rezonanční frekvence může být považována za důsledek několika druhů poruch. Z hlediska této práce se budeme věnovat také popisu změny rezonanční frekvence a kvality rezonátoru způsobenou nedokonalostí jeho stěn a dielektrickými materiály umístěnými uvnitř tohoto rezonátoru. Pro popis této situace s výhodou využijeme známou Slaterovu poruchovou metodu [80].

V popisu vycházíme z ideální situace, kdy je rezonátor dokonale uzavřen, jeho stěny mají ideální (nekonečnou) vodivost a v objemu rezonátoru je dokonale homogenní prostředí. V takovém prostředí je možno nalézt rozložení elektromagnetického pole analytickou metodou. Za předpokladu, že vycházíme z homogenních Maxwellových rovnic (11) a (12), získáme vlnové rovnice pro dílčí složky elektromagnetického pole

$$\nabla^2 \vec{E}_a + k_a^2 \vec{E}_a = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 \vec{H}_a + k_a^2 \vec{H}_a = 0, \quad (12)$$

kde k_a je vlnové číslo, \vec{E}_a a \vec{H}_a pak funkce označující rozložení neporušeného pole pro jednotlivé vidy. Tyto rovnice mohou mít nekonečný počet řešení vycházející z nekonečného množství hodnot k_a a příslušných okrajových podmínek.

Nyní se pokusíme najít rovnici vyjadřující obecné pole rezonátoru. Za předpokladu, že hledané pole nebude příliš porušeno, jej můžeme hledat jako lineární kombinaci jednotlivých módů pole neporušeného. Budeme tedy uvažovat testovací funkci \vec{A} , kterou zapíšeme jako nekonečnou sumu básových funkcí \vec{E}_a násobených příslušným koeficientem rozvoje (13)

$$\vec{A} = \sum_a e_a \vec{E}_a. \quad (13)$$

Pokud pak testovací funkci \vec{A} vynásobíme libovolnou básovou funkcí a výsledek poté integrujeme přes celý objem, obdržíme příslušný koeficient rozvoje za předpokladu, že funkce jsou ortogonální a normalizované (14).

$$e_a = \int_V \vec{A} \cdot \vec{E}_a dV. \quad (14)$$

Tento rozvoj pak můžeme přepsat do formy (15)

$$\vec{A} = \sum_a \vec{E}_a \int_V \vec{A} \cdot \vec{E}_a dV. \quad (15)$$

Výsledný rozvoj pak použijeme pro popis vektorových polí vyskytujících se v Maxwellových rovnicích. Získáme tedy výrazy (16), (17) a (18).

$$\vec{E} = \sum_a \vec{E}_a \int_V \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV, \quad (16)$$

$$\vec{H} = \sum_a \vec{H}_a \int_V \vec{H} \cdot \vec{H}_a dV, \quad (17)$$

$$\vec{J} = \sum_a \vec{E}_a \int_V \vec{J} \cdot \vec{E}_a dV. \quad (18)$$

Tyto výrazy vhodně dosadíme do Maxwellových rovnic. Další úpravou popsanou v [80] a separací rovnice pro elektrickou a magnetickou složku pole získáme následující vztahy (19) a (20).

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d^2}{dt^2} \int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV + k_a^2 \int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV = \\ - \mu_0 \frac{d}{dt} \left(\int \vec{J} \cdot \vec{E}_a dV - \int_{S'} (\vec{n} \times \vec{H}) \cdot \vec{E}_a dA \right) - k_a \int_S (\vec{n} \times \vec{E}) \cdot \vec{H}_a dA, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d^2}{dt^2} \int \vec{H} \cdot \vec{H}_a dV + k_a^2 \int \vec{H} \cdot \vec{H}_a dV = k_a \left(\int \vec{J} \cdot \vec{E}_a dV - \int_{S'} (\vec{n} \times \vec{H}) \cdot \vec{E}_a dA \right) \\ - \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S (\vec{n} \times \vec{E}) \cdot \vec{H}_a dA. \end{aligned} \quad (20)$$

Pro $\int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV$ a $\int \vec{H} \cdot \vec{H}_a dV$ dostáváme vlnovou rovnici, v tomto případě s nenulovou pravou stranou. Význam jednotlivých členů na pravé straně rovnice je pak následující: při analogii s jednoduchým harmonickým pohybem představují vnější síly prvek, který mění rezonanční frekvenci oscilátoru. Vůči neporušenému stavu tak získáváme pozměněné elektromagnetické pole a s tím i rezonanční frekvenci [81]. Ta je na základě předchozích poznatků tedy ovlivněna:

- a) proudy protékajícími rezonátorem,
- b) otvory ve stěnách rezonátoru (nedokonalá rezonanční dutina),
- c) konečnou vodivostí stěn rezonátoru (způsobená nenulovou tangenciální složkou \vec{E}).

Pro následnou analýzu změn rezonanční frekvence a kvality rezonátoru musíme vzít v potaz nenulovou pravou stranu rovnice (19), která má v tomto směru dominantní vliv. Dle Slaterovy poruchové metody využijeme analogii s rezonančním obvodem definovaným RLC parametry. Pro rezonanční frekvenci ω můžeme nalézt vztah (21)

$$j \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) + \frac{1}{Q} = 0, \quad (21)$$

kde ω_0 je rezonanční frekvence LC obvodu. Dále budeme uvažovat, že se úhlová frekvence ω_0 příliš neliší od jedné z rezonančních frekvencí ω_a . Můžeme tak zapsat, že

$$\omega_0 = \omega_a + \Delta\omega_a, \quad (22)$$

z čehož pak plyne

$$j \left(\frac{\omega}{\omega_a} - \frac{\omega_a}{\omega} \right) + \frac{1}{Q} - 2j \frac{\Delta\omega_a}{\omega_a} = 0. \quad (23)$$

Za pomoci vztahu (23) pak můžeme snadno vyjádřit změny rezonanční frekvence dané výše uvedenými efekty: zejména proudy protékajícími rezonátorem, otvory ve stěnách rezonátoru a konečnou vodivostí rezonátoru (24).

$$\frac{1}{Q} - 2j \frac{\Delta\omega_a}{\omega_a} = - \frac{j}{\omega_a \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \frac{\int_S (\vec{n} \times \vec{E}) \cdot \vec{H}_a dA}{\int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV} - \frac{1}{\epsilon_0 \omega_0} \frac{\int_{S'} (\vec{n} \times \vec{H}) \cdot \vec{E}_a dA}{\int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV} + \frac{1}{\epsilon_0 \omega_a} \frac{\int \vec{J} \cdot \vec{E}_a dV}{\int \vec{E} \cdot \vec{E}_a dV}. \quad (24)$$

Vztah (24) můžeme tedy považovat za základní vyjádření změn vlastností rezonátoru. Nyní můžeme výše uvedený vztah aplikovat na prostředí dutinového rezonátoru tvořeného karoserií vozidla. Při této úvaze musíme respektovat následující podmínky, které odlišují ideální rezonátor od popisovaného reálného rezonátoru:

- a) rezonátor je tvořen materiálem s konečnou vodivostí stěn,
- b) stěny rezonátoru jsou v reálných podmínkách kryty vrstvou dielektrických materiálů (látky potahu, tlumící pěny),
- c) rezonanční dutina pro svou nepravidelnost umožňuje vznik vidů pouze v určitých svých částech,
- d) rezonátor obsahuje velkou řadu otvorů významně snižujících jeho jakost.

Komplexní rezonanční kmitočet dutinového rezonátoru můžeme následně vyjádřit vztahem (25)

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{2Q_0}\right) + j \frac{\omega_0}{2Q_0} = \omega_a + j \frac{\omega_0}{2Q_0}. \quad (25)$$

Časový průběh harmonických kmitů elektromagnetického pole v dutině rezonátoru je potom definován (26)

$$e^{j\omega_0 t \cdot \left(1 - \frac{1}{2Q_0}\right)} \cdot e^{-\frac{\omega_0}{2Q_0} t} = e^{j\omega_a t} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (26)$$

Platí, že kmitočet ω_a vlastních kmitů rezonátoru se při $Q_0 \gg 1$ jen velmi nepatrně liší od rezonančního kmitočtu ω_0 stejné dutiny s ideálně vodivými stěnami. Vlivem konečné velikosti Q_0 jsou pak vlastní kmit v dutině tlumeny. Velikost těchto kmitů klesá s časovou konstantou (27)

$$\tau = \frac{2 \cdot Q_0}{\omega_0}. \quad (27)$$

Činitel jakosti nezatíženého rezonátoru můžeme pak vyjádřit vztahem (28)

$$Q_0 = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_Z}, \quad (28)$$

kde ω_0 je úhlový rezonanční kmitočet rezonátoru, W je střední hodnota celkové energie elektromagnetického pole v dutině rezonátoru při rezonanci a P_z střední hodnota činného výkonu ztraceného v rezonátoru.

Vzhledem k tomu, že vnitřní prostor rezonátoru tvořený karoserií vozidla lze při zjednodušení považovat za rezonátor s nedokonalé vodivými stěnami, které navíc nejsou zcela hladké, můžeme zapsat, že

$$Q_0 \approx \frac{2}{\sqrt{2} \cdot \delta} \cdot \frac{V}{S_p} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \cdot \frac{V}{S_p}, \quad (29)$$

neboť předpokládáme, že hloubka vniku δ je menší než drsnost povrchu vodiče. V pak představuje objem dutiny, S_p vnitřní plochu kovového pláště dutiny a δ pak hloubku vniku do vodivých stěn rezonátoru při rezonančním kmitočtu.

V popisu chování vnitřního prostoru automobilu z hlediska vzniku vlastních rezonancí při vybuzení vnějším zdrojem pole, můžeme vycházet z poznatků týkajících se kvádrového rezonátoru, ke kterému může být pro účely prvotního přiblížení dle obrázku (Obr. 6) tato dutina přirovnána. Numericky pak můžeme při zobecnění základní parametry takové dutiny vyjádřit podle vztahu (30)

$$f_0 = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}, \quad (30)$$

kde f_0 představuje rezonanční kmitočet rezonátoru; m, n, p celá vidová čísla; a, b, l rozměry rezonátoru a c rychlost světla ve vakuu.

2.2.2. TESTOVACÍ MODEL PRO OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI METOD ŘEŠENÍ

Nyní zaměříme pozornost na vhodný návrh testovacího modelu dutinového rezonátoru, pomocí kterého ověříme správnost výpočtu pomocí zvolených numerických metod. Při návrhu musíme vzít v úvahu následující aspekty:

- 1) model musí vycházet z následně řešené struktury karoserie, musí tedy respektovat její základní proporce a rozměry, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky,
- 2) navrhovaný model musí být navržen takovým způsobem, aby numerický výpočet jeho rezonanční frekvence byl dosažitelný pomocí analytických i numerických metod,
- 3) model by měl být dostatečně modulární, aby bylo možno v rámci jedné struktury ověřit jak jeho základní vlastnosti (rezonanční frekvence dutiny za ideálních podmínek), tak vlastnosti blížíící se reálnému problému (rezonanční frekvence při přítomnosti otvorů v objemu rezonátoru, ztrátový materiál na jeho povrchu, dielektrikum uvnitř rezonátoru).

Na základě výše uvedených aspektů vyjdeme ze základních rozměrů vnitřního prostoru vozu Škoda Octavia 3. generace za účelem splnění první podmínky o respektování základních proporcí, neboť vůz Škoda Octavia bude následně použit pro praktická měření i numerické ověření výsledků. Základní rozměry karoserie vozu můžeme vidět na obrázku (Obr. 6).



Obr. 6 – Základní rozměry vozu Škoda Octavia 3. generace, použitého pro přípravu testovacího modelu.
Převzato z [82].

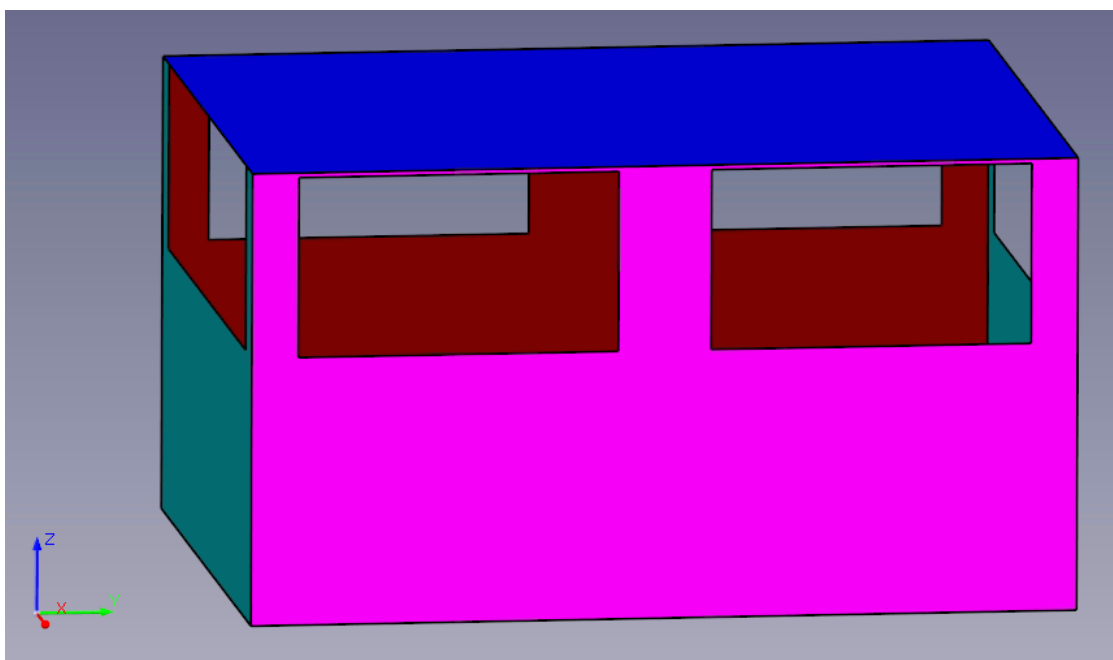
Při pohledu na dutinu tvořící vnitřní prostor pro posádku automobilu musíme konstatovat, že její přesný model by byl pro účely ověření funkčnosti navrhované numerické metody příliš složitý, jeho konstrukce velmi obtížná a prakticky by nahrazovala vlastní simulační výpočty při zanedbání některých základních prvků vozidla. Budeme proto uvažovat pouze zjednodušenou rezonanční dutinu o rozměrech odpovídajících průměrným hodnotám v dané ose a značně zjednodušíme dutiny pro okna automobilu. Okna mají v reálném vozidle nepravidelný tvar, respektující navíc částečně elipsoidní tvar střechy vozidla, který určuje zakřivení jednotlivých skleněných výplní, zejména pak čelního a zadního okna. Při zanedbání těchto vlastností a nahrazení těchto složitě popsateľných otvorů prostými obdélníky o rozměrech 400 x 1 250 mm v případě čelního i zadního okna a 400 x 690 mm v případě všech bočních oken, získáváme základní rozměry celé zjednodušené rezonanční dutiny

$$x = 1\,450\text{ mm},$$

$$y = 1\,780\text{ mm},$$

$$z = 980\text{ mm}.$$

Dle výše uvedených poznatků provedeme konstrukci zjednodušeného modelu (Obr. 7). V tomto modelu budeme zcela zanedbávat vnitřní vybavení vozidla, které by i přes zřejmé přínosy do změn rezonanční frekvence (kovové výztuhy sedadel, volantu, palubní desky) model velmi komplikovalo. Analýzu těchto vlivů provedeme až následně, na detailním modelu vozidla pomocí zvolené a ověřené numerické metody.



Obr. 7 – Navržený testovací model, reprezentující vnitřní prostor karoserie vozidla Škoda Octavia.

2.2.3. OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI ZVOLENÝCH NUMERICKÝCH METOD

Pro ověření správné funkce navrhované výpočetní metody použijeme tři nezávislé způsoby výpočtů rezonančních frekvencí a rozložení pole uvnitř navrženého modelu. Nejprve se pokusíme vypočítat teoretické hodnoty rezonančních frekvencí analytickým způsobem, na základě odvozených vztahů uvedených v kapitole 2.1.1. Dále pak použijeme výpočet pomocí MoM aplikované v SW nástroji EMC Studio a na závěr využijeme metodu FDTD, aplikovanou v CST MWS.

Abychom dokázali porovnat správnost výsledků získaných pomocí SW řešení, musíme nejdříve získat základní představu o rezonančních frekvencích, které mohou v uvažované dutině vzniknout. Dle vztahu (30) při uvažovaných rozměrech dutiny vypočítáme rezonanční frekvence pro jednotlivé vidy definovaného rezonátoru. Vypočtené rezonanční frekvence jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 3 a

Tabulka 4). Těchto rezonančních frekvencí teoreticky existuje nekonečný počet, pro účely této práce se však budeme zabírat pouze rezonančními frekvencemi pro maximální vidové číslo 3.

Tabulka 3 - Rezonanční frekvence vypočtené pro vidy TM (maximální vidové číslo 3)

m	n	p	X [m]	Z [m]	Y [m]	f₀ [MHz]
1	1	0	1,45	0,98	1,78	184,74
1	1	1	1,45	0,98	1,78	203,05
2	1	0	1,45	0,98	1,78	257,36
2	1	1	1,45	0,98	1,78	270,80
2	1	2	1,45	0,98	1,78	307,64
2	2	0	1,45	0,98	1,78	369,48
2	2	1	1,45	0,98	1,78	378,97
2	2	2	1,45	0,98	1,78	406,11
3	1	0	1,45	0,98	1,78	346,04
3	1	1	1,45	0,98	1,78	356,15
3	1	2	1,45	0,98	1,78	384,90
3	2	0	1,45	0,98	1,78	435,92
3	2	1	1,45	0,98	1,78	443,99
3	2	2	1,45	0,98	1,78	467,37
3	2	3	1,45	0,98	1,78	503,92
3	3	1	1,45	0,98	1,78	560,59
3	3	2	1,45	0,98	1,78	579,28
3	3	3	1,45	0,98	1,78	609,16

Tabulka 4 - Rezonanční frekvence vypočtené pro vidy TE (maximální vidové číslo 3)

m	n	p	X [m]	Z [m]	Y [m]	f₀ [MHz]
1	0	1	1,45	0,98	1,78	133,43
1	1	1	1,45	0,98	1,78	203,05
2	0	1	1,45	0,98	1,78	223,40
2	1	1	1,45	0,98	1,78	270,80
2	0	2	1,45	0,98	1,78	266,86
2	1	2	1,45	0,98	1,78	307,64
2	2	1	1,45	0,98	1,78	378,97
2	2	2	1,45	0,98	1,78	406,11
3	0	1	1,45	0,98	1,78	321,58
3	1	1	1,45	0,98	1,78	356,15
3	0	2	1,45	0,98	1,78	353,16
3	1	2	1,45	0,98	1,78	384,90
3	2	1	1,45	0,98	1,78	443,99
3	2	2	1,45	0,98	1,78	467,37
3	0	3	1,45	0,98	1,78	400,28
3	1	3	1,45	0,98	1,78	428,55
3	2	3	1,45	0,98	1,78	503,92
3	3	1	1,45	0,98	1,78	560,59
3	3	2	1,45	0,98	1,78	579,28
3	3	3	1,45	0,98	1,78	609,16

Dále pokračujeme s analýzou pomocí numerických metod. Z důvodu porovnatelnosti výsledků zvolíme pro obě testované numerické metody shodné okrajové podmínky, definici materiálu modelu, zdroj zkušebního pole i metody vyhodnocení. Následující popis je tedy uveden pro oba simulační nástroje shodně, není-li uvedeno jinak.

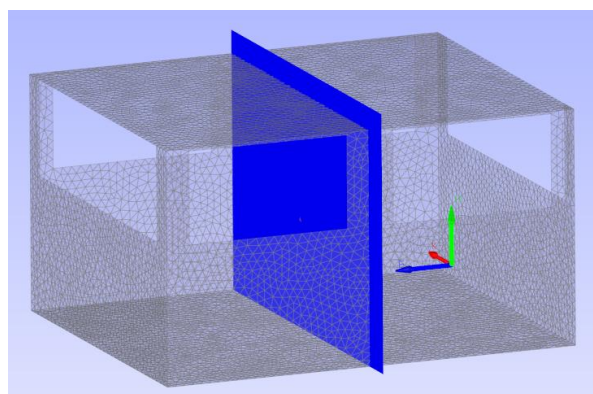
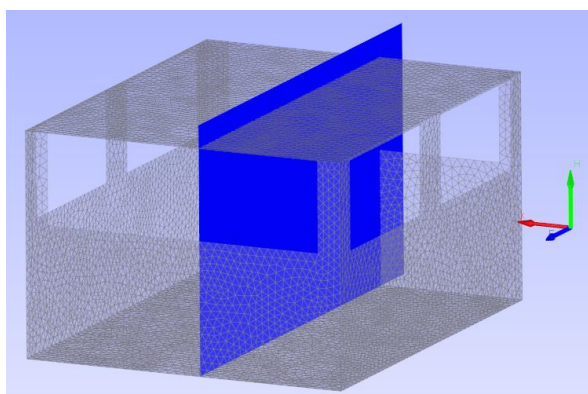
Model o definované geometrii (viz Obr. 7) umístíme do volného prostoru, pro účely simulace tvořeného vakuem s permitivitou $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Stěny testovacího modelu jsou tvořeny ideálním elektrickým vodičem (PEC) s teoreticky $\sigma \rightarrow \infty$, $\tau \rightarrow 0$. Uvnitř modelu se nachází vakuum.

Jako zdroj elektromagnetického pole použijeme vertikálně a horizontálně polarizovanou rovinnou vlnu s $E = 1$ V.m⁻¹, která představuje ideální stav buzení. Tento způsob sice není dokonalý, ale při uvážení smyslu tohoto ověřovacího pokusu jej považujeme za dostatečný pro ověření správné funkce řešiče.

Použijeme čtyři základní konfigurace testovacího modelu a umístění zdroje rovinné vlny:

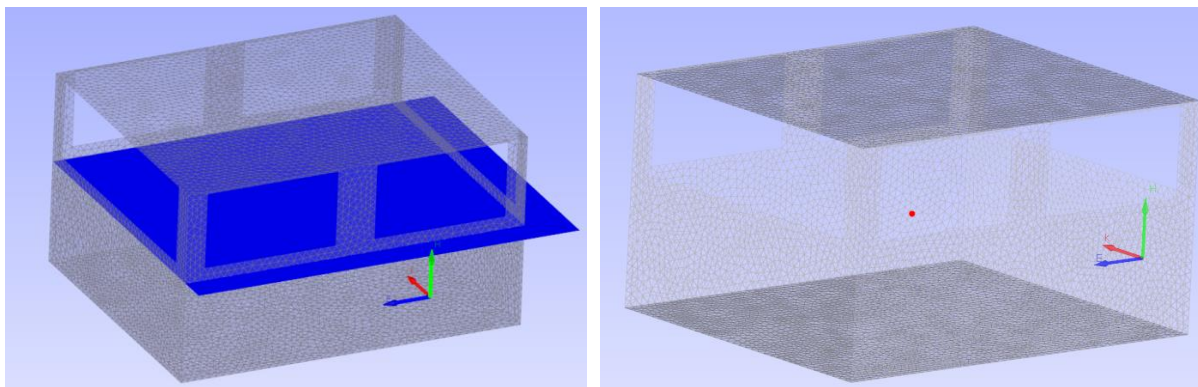
- 1) Zdroj vlnění z čela testovacího modelu
 - a) s vertikální polarizací,
 - b) s horizontální polarizací.
- 2) Zdroj vlnění z boku testovacího modelu
 - a) s vertikální polarizací,
 - b) s horizontální polarizací.

Pro účely vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu jsme stanovili řezné roviny procházející vždy osou dané stěny. Získáme tak 3 řezy (Obr. 8, Obr. 9, Obr. 10), umožňující získat grafický přehled o vzniku jednotlivých maxim uvnitř dutiny. Navíc bude pro účely numerického vyhodnocení do geometrického středu kvádru se souřadnicemi $x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 450$ mm umístěna virtuální sonda elektrického pole (Obr. 11) měřící intenzitu elektrického pole E v osách x , y , z .



Obr. 8 (vlevo) – Zobrazení řezné roviny Y pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.

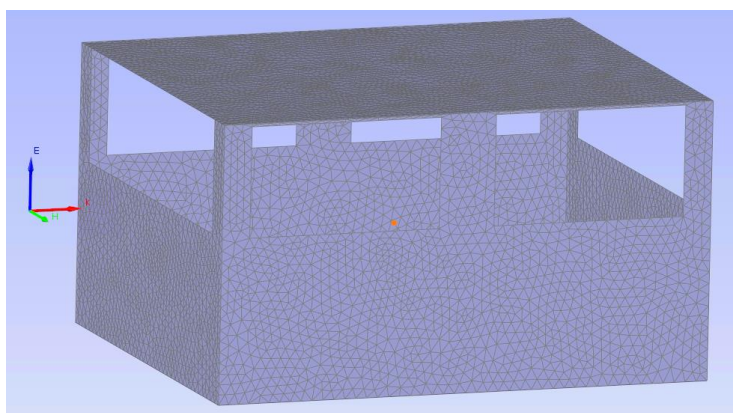
Obr. 9 (vpravo) – Zobrazení řezné roviny X pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.



Obr. 10 (vlevo) - Zobrazení řezné roviny Z pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.

Obr. 11 (vpravo) – Umístění virtuální sondy elektrického pole uvnitř testovacího modelu v jeho geometrickém středu na souřadnicích $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$.

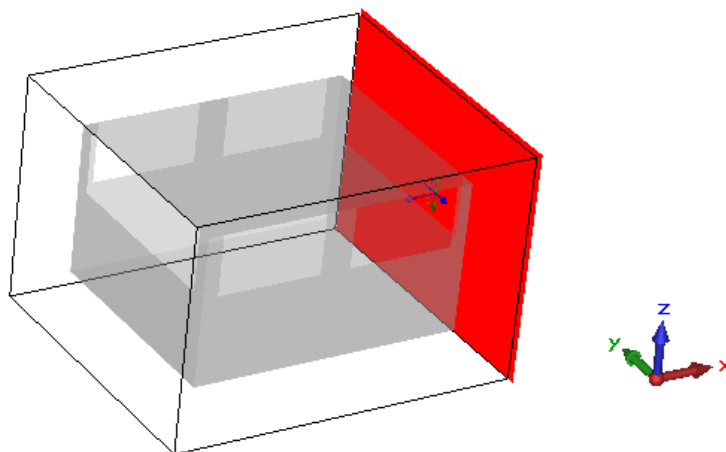
Jako první z testovaných numerických metod použijeme Momentovou metodu, aplikovanou v prostředí nástroje EMC Studio, verze 8.1 [74]. Pro řešení rovnic bude použit řešič AGGR s dvojitou přesností. V rámci simulačního nástroje byl vytvořen model (Obr. 12) odpovídající struktuře navržené na (Obr. 7). Tento model je pro účely simulace tvořen sítí s trojúhelníkovými segmenty s maximální velikostí hrany 4 cm. Při splnění podmínky $\lambda_{MAX}/10$ jej můžeme využít až do hraniční frekvence 750 MHz. Při dodržení definované geometrie a rozměrů je pak model tvořen 16 470 prvky, což jej činí relativně složitým pro výpočet. Bylo by možno uvažovat o zvýšení velikosti prvků sítě až na 10 cm (a tím snížení jejich celkového počtu nutného pro konstrukci modelu), přičemž model by zůstal použitelný do maximální frekvence 300 MHz. Vzhledem k tomu, že ale horní hranice pro výpočet pomocí této metody není v tuto chvíli ještě pevně stanovena, budeme pracovat s rezervou a modelem použitelným až do 750 MHz. Rovněž v této situaci neuvažujeme lokální zahuštění sítě modelu na jeho hranách, což bude u modelu vozidla pro dosažení správných výsledků nezbytná podmínka. Model je tvořen ideálně vodivým materiálem (PEC), uvnitř modelu se nachází vakuum. Testovací model je obklopen volným prostorem.



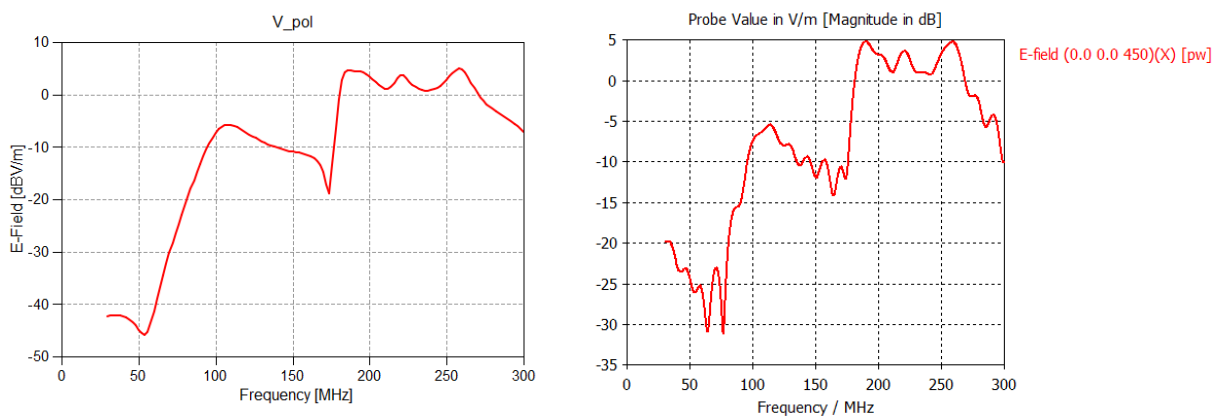
Obr. 12 – Testovací model tvořený trojúhelníkovou sítí připravený k simulaci rozložení intenzity elektrického pole pomocí MoM. Na obrázku vlevo je zdroj zkušební pole.

Jako druhou zkušební metodu použijeme FDTD aplikovanou v prostředí CST MWS Studio. Model pro simulaci zůstává geometricky stejný jako v předchozím případě, jeho materiálové parametry se rovněž neliší. Testovací model je umístěn ve volném prostoru (stejně jako v předchozím případě není definována zemní rovina).

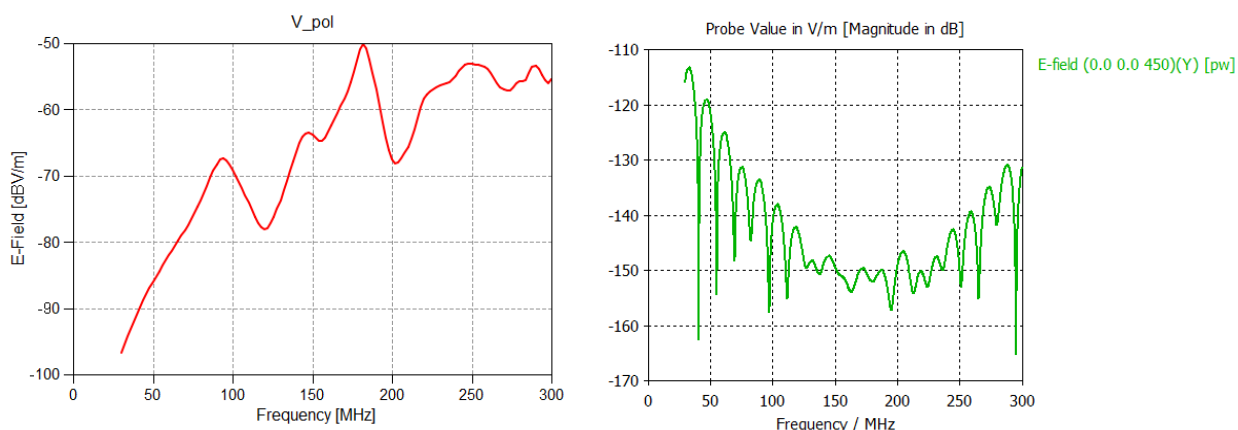
Byly opět provedeny výpočty pro všechny čtyři předem definované konfigurace testovacího modelu, dvě pozice vůči zdroji zkušebního pole (Obr. 13 a Obr. 21) a obě polarizace. Výsledky vypočtených intenzit pole pomocí obou numerických metod v jednotlivých složkách jsou uvedeny na obrázcích (Obr. 14 až Obr. 18) a dále na obrázcích (Obr. 22 až Obr. 27). Na obrázcích (Obr. 19 a Obr. 20) je pak možno nalézt srovnání absolutních hodnot $|E_{\text{tot}}|$ pro expozici modelu z čela, na obrázcích (Obr. 28 a Obr. 29) pak $|E_{\text{tot}}|$ pro expozici modelu z boku v obou polarizacích.



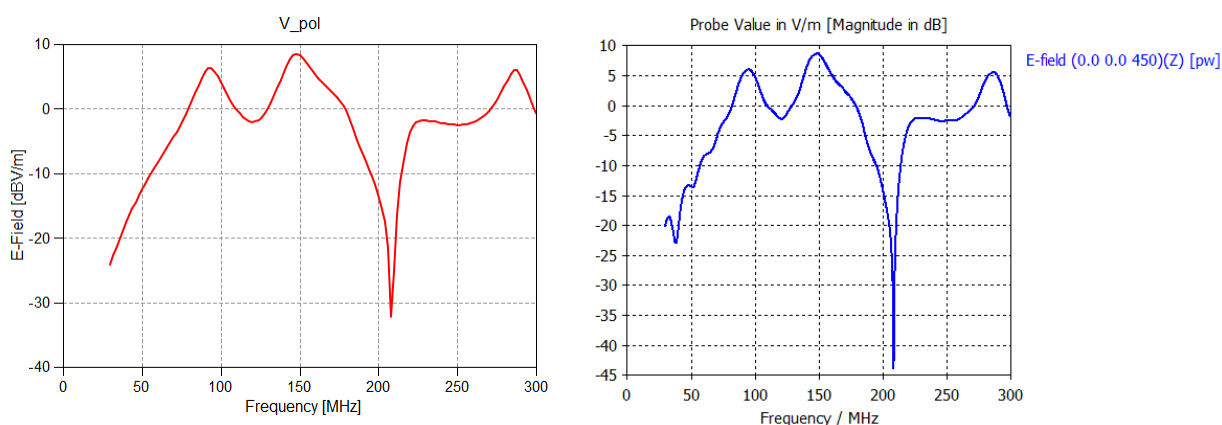
Obr. 13 – Orientace zkušebnímu modelu vůči měřicím osám při expozici zkušebním polem tvořeným rovinnou vlnou z čela modelu. Červeně označena vlnoplocha přicházející rovinné vlny.



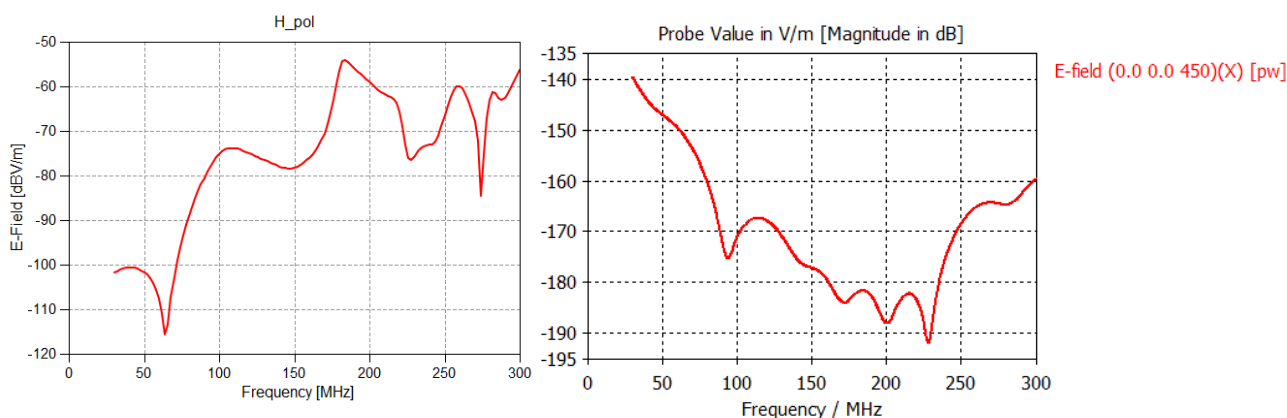
Obr. 14 – Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



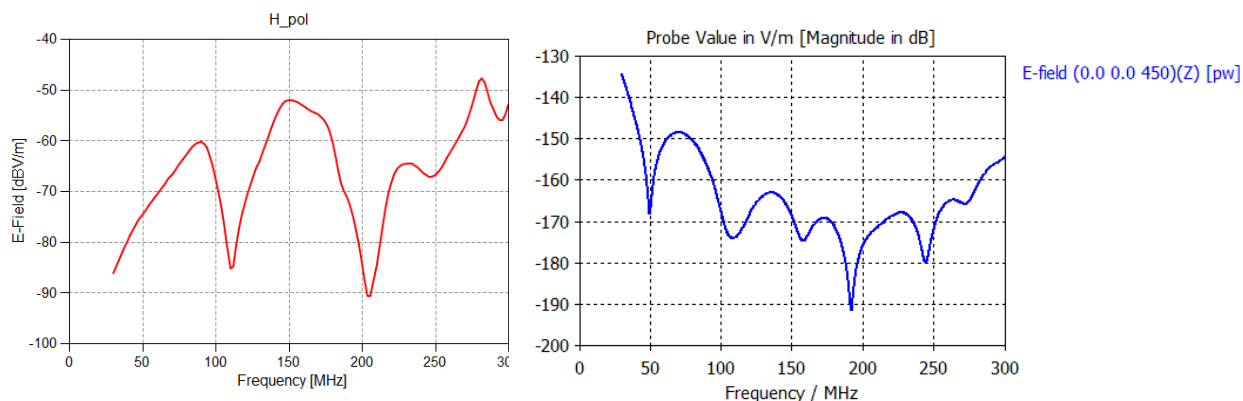
Obr. 15 – Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



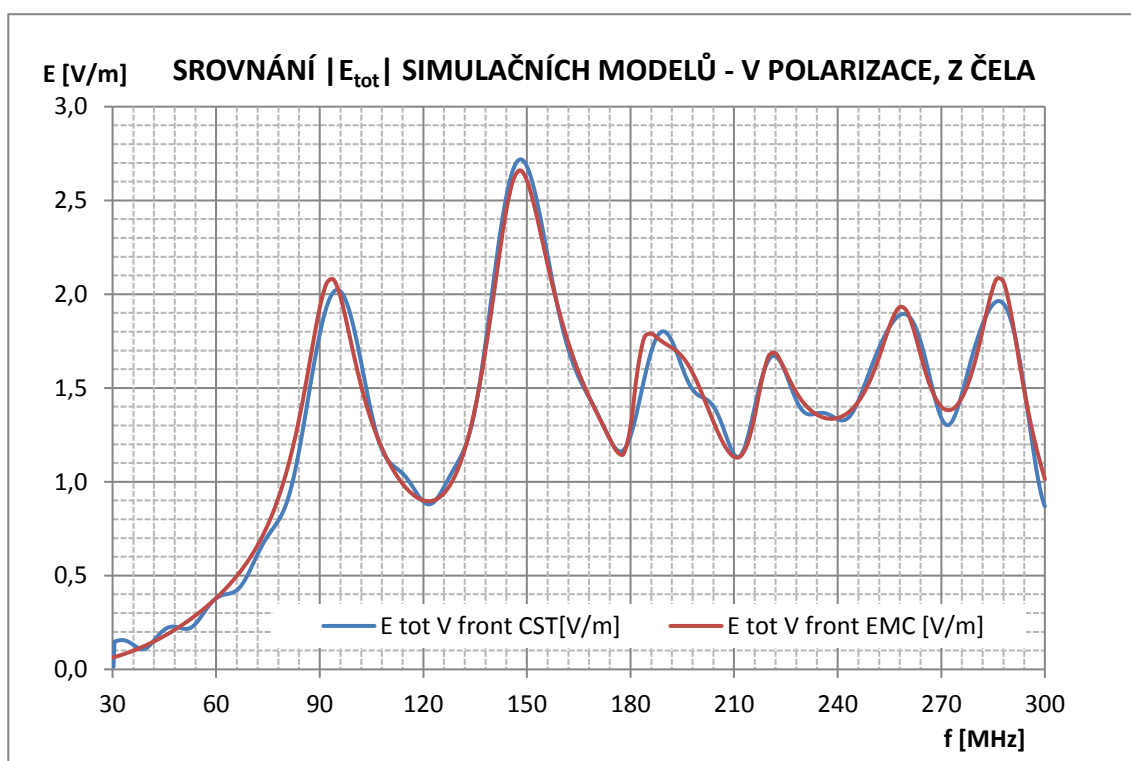
Obr. 16 – Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



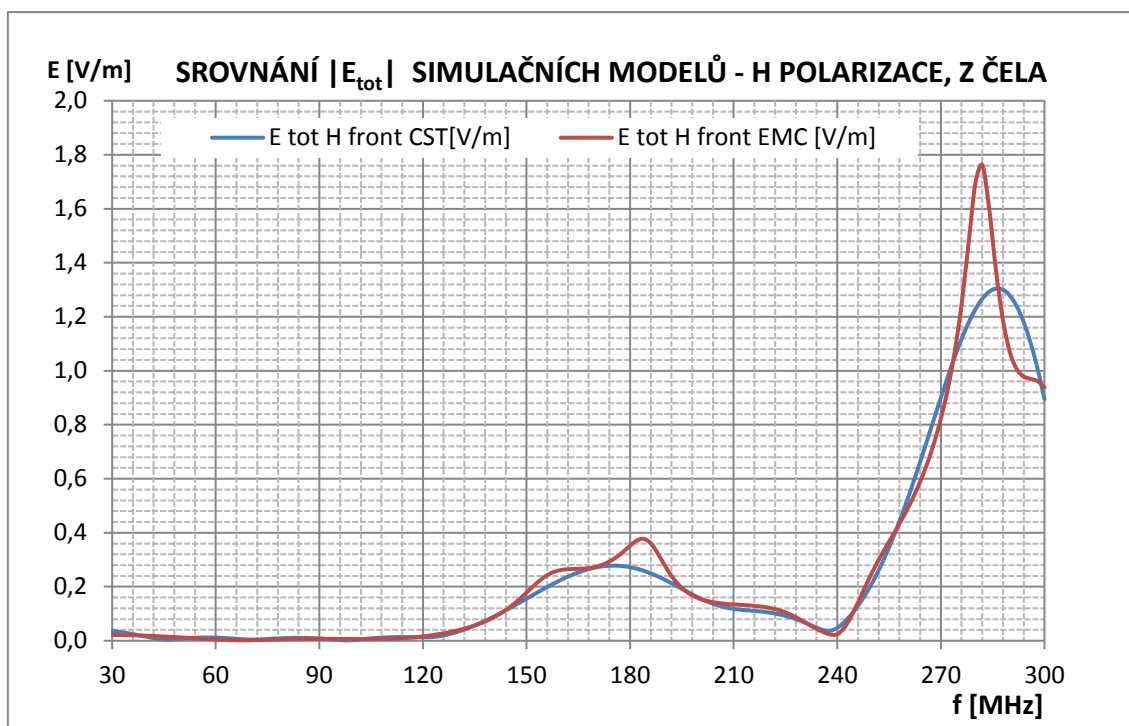
Obr. 17 – Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



Obr. 18 – Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



Obr. 19 – Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $|E_{\text{tot}}|$ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.



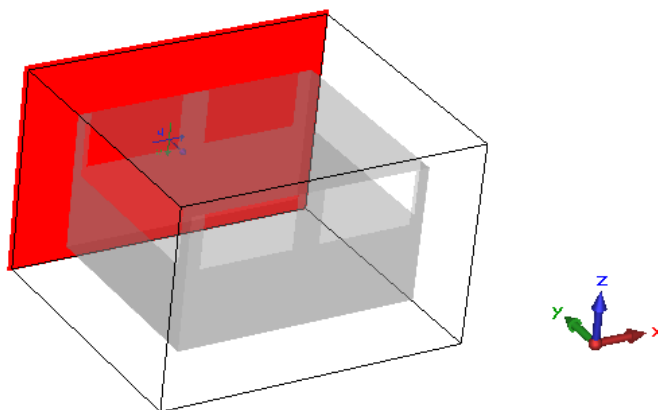
Obr. 20 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $|E_{tot}|$ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.

Při podrobné analýze jednotlivých složek intenzity elektrického pole získané pro vertikální i horizontální polarizaci při expozici testovacího modelu rovinnou vlnou z čela modelu (viz Obr. 14 až Obr. 18) jsme došli k následujícím závěrům:

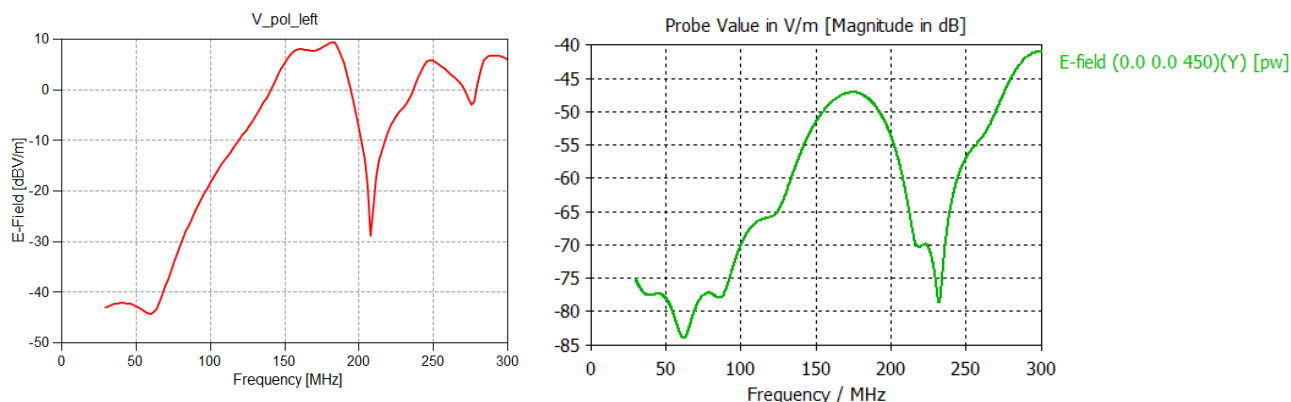
- 1) Při expozici testovacího modelu vertikálně polarizovanou vlnou z čela je hlavní příspěvek celkové intenzity elektrického pole E tvořen složkou E_z . Ostatní složky E_y a E_x mají pouze okrajový vliv. Tento pozorovaný jev odpovídá teoretickým předpokladům, neboť právě ve směru osy Z měřicí sondy kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} přicházející rovinné vlny. Stejného výsledku bylo dosaženo pomocí obou simulačních nástrojů.
- 2) Při obdobné expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou tvoří hlavní příspěvek $|E_{tot}|$ složka E_y , neboť stejně jako v předchozím případě kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} právě ve směru osy Y měřicí sondy. Stejného výsledku bylo opět dosaženo pomocí obou simulačních nástrojů.
- 3) Absolutní hodnoty jednotlivých složek E_x , E_y , E_z získaných pomocí obou SW nástrojů se při vzájemném porovnání liší. Velikost tohoto rozdílu je patrná zejména u nedominantních složek – tedy u Y (Obr. 15) při zkoušce vertikálně polarizovanou vlnou a Z (Obr. 18) při zkoušce horizontálně polarizovanou vlnou. Vzhledem k jejich minimálnímu příspěvku je ovšem celková chyba zanedbatelná. Naopak rozdíly u dominantních složek Z (Obr. 16) pro vertikální polarizaci a Y (Obr. 17) pro horizontální jsou velmi zanedbatelné a výsledky obou numerických metod se navzájem podporují.

- 4) Při srovnání absolutní hodnoty intenzity elektrického pole $|E_{tot}|$ (Obr. 19) měřené virtuální sondou při expozici vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou dosahují obě numerické metody velmi vysoké shody s maximální odchylkou $\pm 0,1$ V/m. Tyto drobné rozdíly si vysvětlujeme jako chybu aproximace e_x použité numerické metody (MoM). Momentová metoda umožnila v daném čase nalézt v intervalu zkoumaných frekvencí celkem 136 bodů s vypočtenou intenzitou elektrického pole, oproti 1 001 bodům získaným pomocí FDTD. Momentová metoda tak neumožnila postihnout jemné odchylky intenzity elektrického pole, což ovšem není v celkovém výsledku zcela rozhodující.
- 5) V případě srovnání absolutní hodnoty intenzity elektrického pole $|E_{tot}|$ (Obr. 20) měřené virtuální sondou při expozici horizontálně polarizovanou rovinnou vlnou dosahují obě numerické metody vysoké shody s maximální odchylkou $\pm 0,2$ V/m, kromě rezonance na kmitočtu 282 MHz. Zde můžeme pozorovat výrazný nárůst $|E_{tot}|$, který je oběma metodami dobře zachycen, ovšem s rozdílnou maximální hodnotou. Ta v případě MoM činí 1,7626 V/m, při použití FDTD pak 1,1859 V/m, přičemž frekvenční maximum je u výsledků získaných FDTD mírně posunuto na frekvenci 288 MHz. Zde již narážíme na chybu numerické metody a odlišného výpočetního jádra.

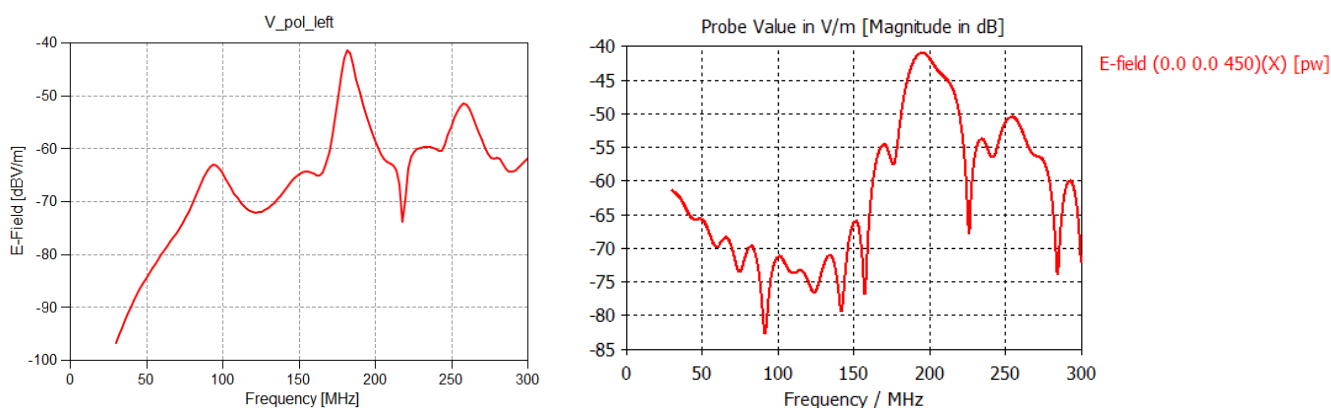
Dále budeme analyzovat jednotlivé složky intenzity elektrického pole v testovacím modelu při expozici vertikálně i horizontálně polarizovanou rovinnou vlnou z boku zkušebního modelu.



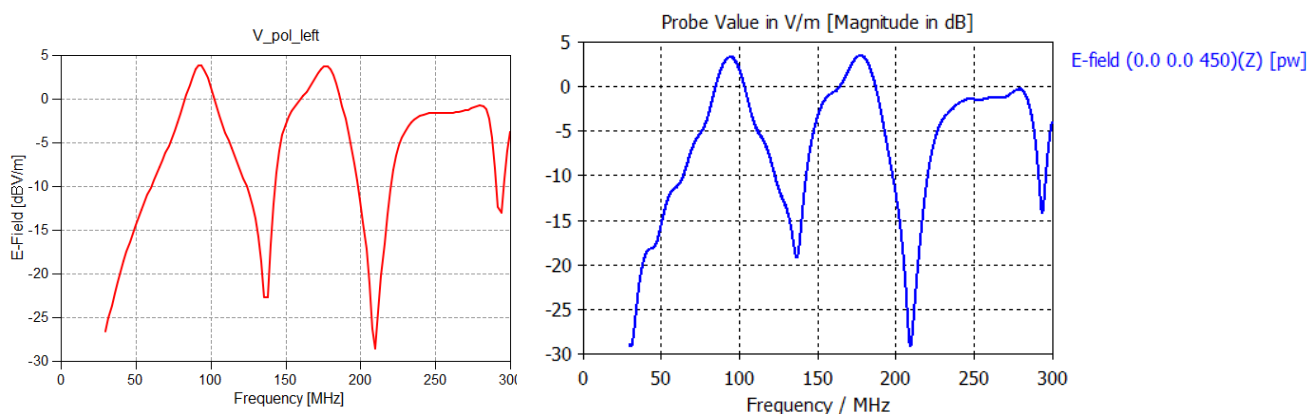
Obr. 21 - Orientace zkušebního modelu vůči měřicím osám při expozici zkušebním polem tvořeným rovinnou vlnou z boku modelu. Červeně označena vlnoplocha přicházející rovinné vlny.



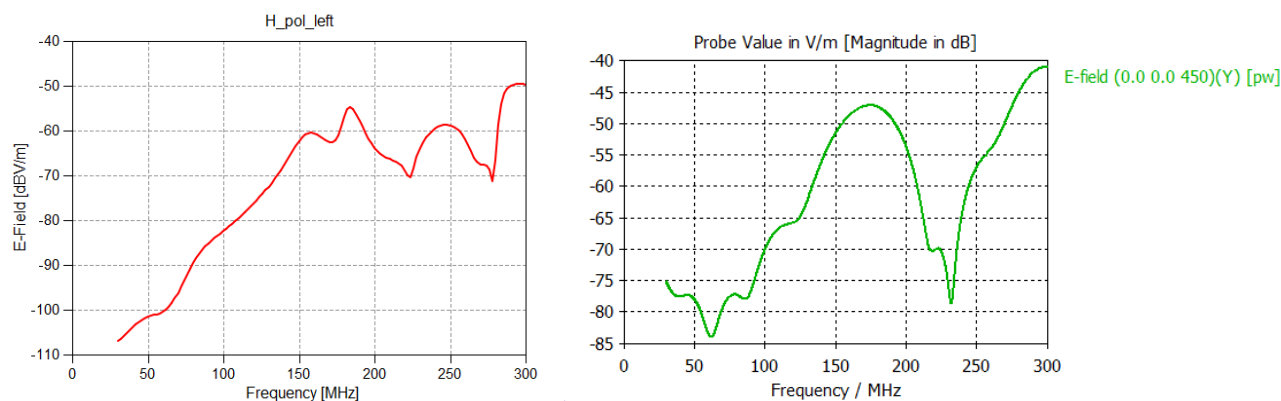
Obr. 22 - Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



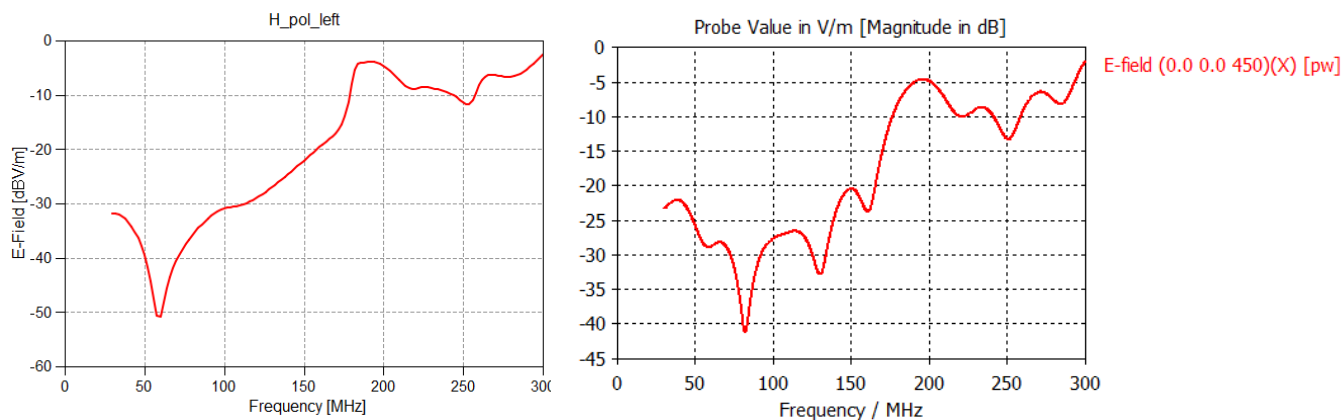
Obr. 23 - Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



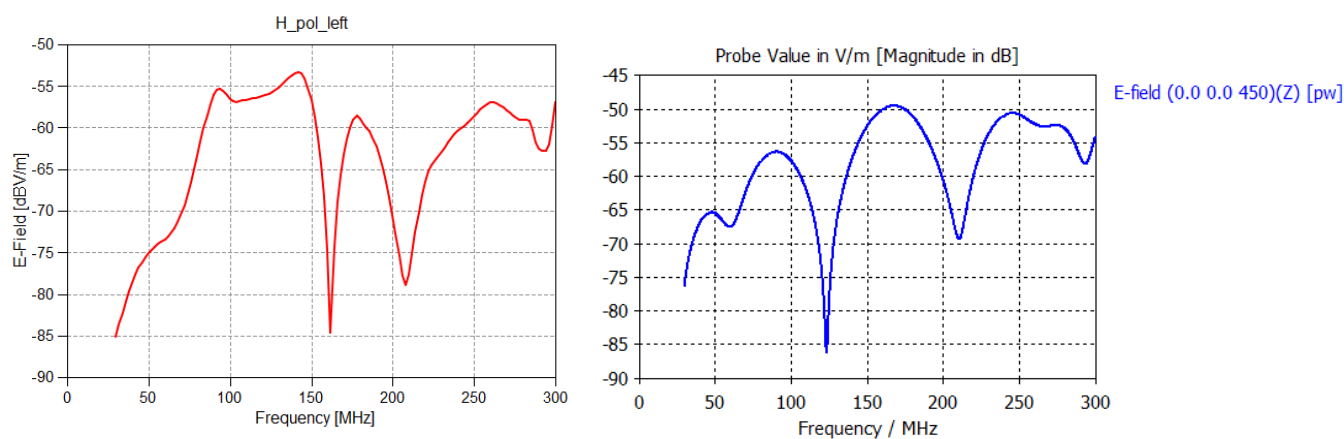
Obr. 24 - Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1$ V/m z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



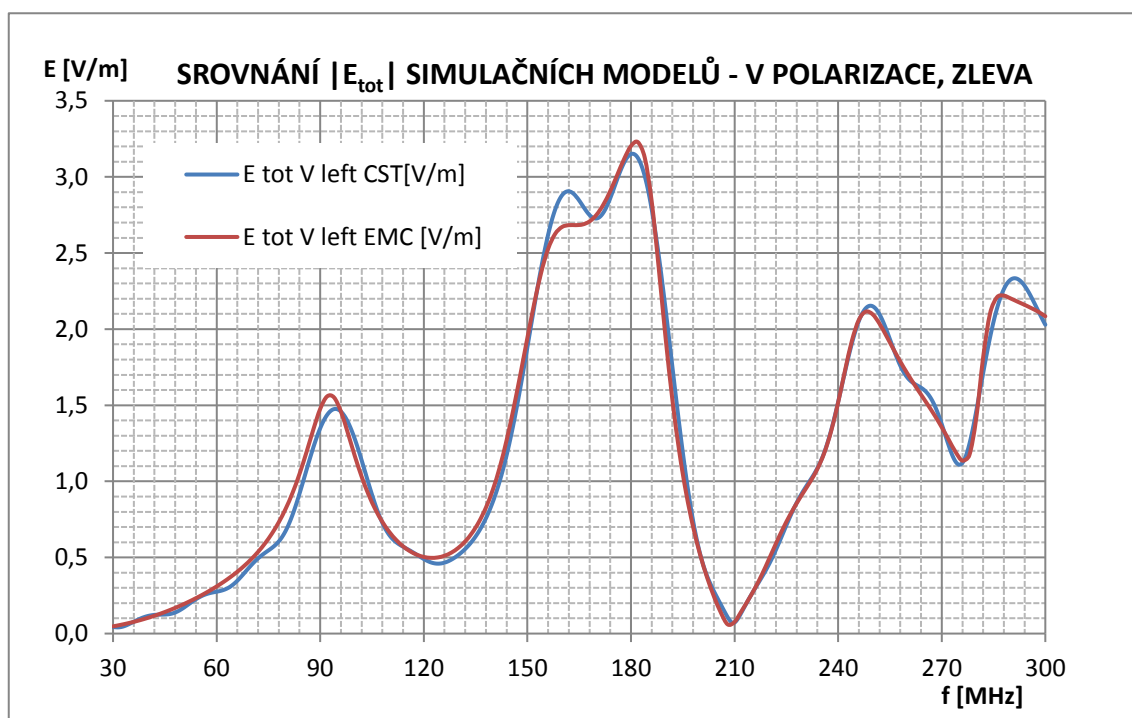
Obr. 25 - Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



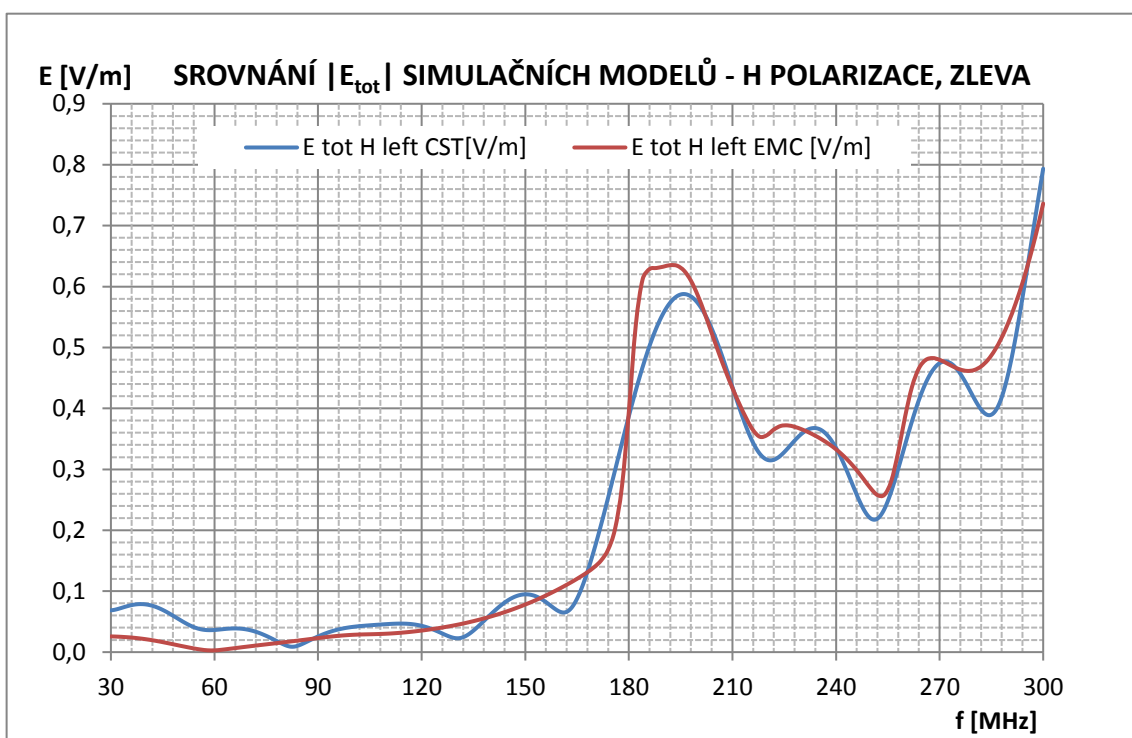
Obr. 26 - Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



Obr. 27 - Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.



Obr. 28 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $|E_{\text{tot}}|$ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z boku vertikálně polarizovanou vlnou.

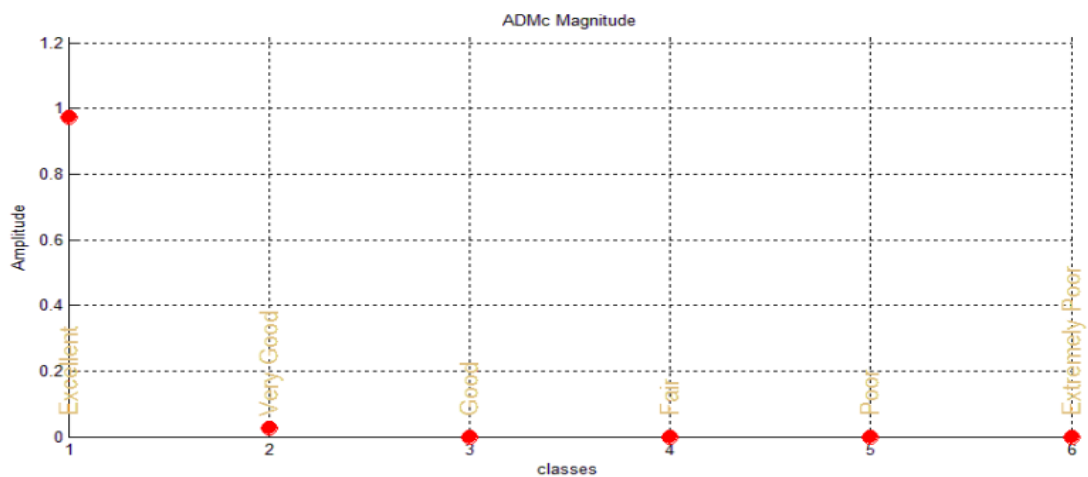


Obr. 29 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $|E_{\text{tot}}|$ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z boku horizontálně polarizovanou vlnou.

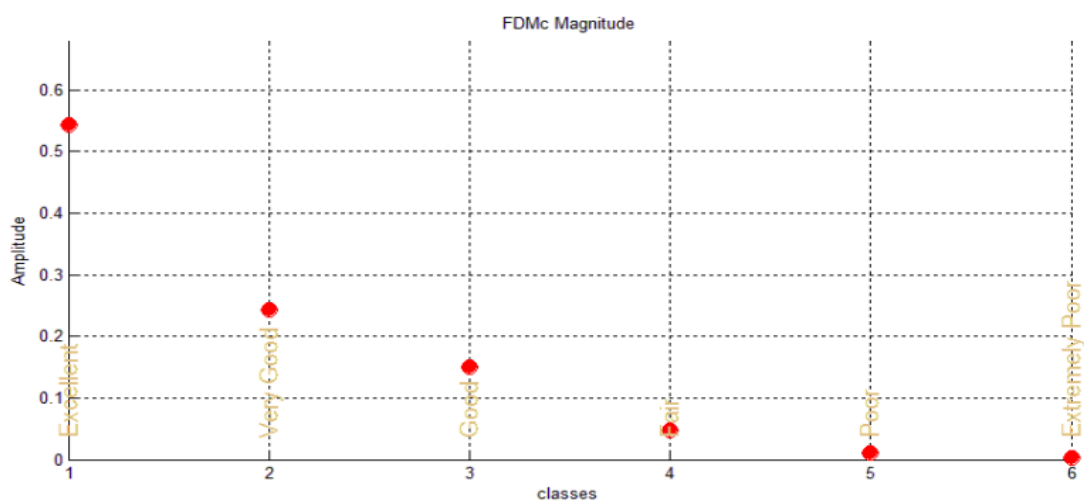
Na základě analýzy složek intenzity elektrického pole získané pro vertikální i horizontální polarizaci při expozici testovacího modelu rovinnou vlnou z boku modelu (Obr. 22 až Obr. 27) pomocí MoM, reprezentované nástrojem EMC Studio a FDTD, zastoupené nástrojem CST MWS, jsme došli k následujícím závěrům:

- 1) Při expozici testovacího modelu vertikálně polarizovanou vlnou z boku je hlavní příspěvek celkové intenzity elektrického pole E tvořen složkou E_z . Ostatní složky E_x a E_y mají pouze částečný vliv na celkovou hodnotu $|E_{tot}|$. Tento pozorovaný jev, stejně jako u expozice z čela modelu, odpovídá teoretickým předpokladům, neboť ve směru osy Z měřicí sondy kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} přicházející rovinné vlny. Stejného výsledku bylo dosaženo pomocí obou simulačních nástrojů.
- 2) Při obdobné expozici testovacího modelu horizontálně polarizovanou vlnou tvoří hlavní příspěvek $|E_{tot}|$ složka X , neboť stejně jako v předchozím případě kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} právě ve směru osy X měřicí sondy. Stejného výsledku bylo opět dosaženo pomocí obou simulačních nástrojů.
- 3) Absolutní hodnoty jednotlivých složek E_x , E_y , E_z , získaných pomocí obou SW nástrojů se při vzájemném porovnání liší. Velikost tohoto rozdílu je patrná zejména u nedominantních složek – tedy u X (Obr. 23) při zkoušce vertikálně polarizovanou vlnou a Z (Obr. 27) při zkoušce horizontálně polarizovanou vlnou. Vzhledem k jejich minimálnímu příspěvku je ovšem celková chyba zanedbatelná. Naopak rozdíly u dominantních složek Z (Obr. 24) pro vertikální polarizaci a X (Obr. 26) pro horizontální jsou velmi zanedbatelné a výsledky obou numerických metod se navzájem podporují.
- 4) Při srovnání absolutní hodnoty intenzity elektrického pole $|E_{tot}|$ (Obr. 28) měřené virtuální sondou při expozici vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou dosahují obě numerické metody dobré shody s maximální odchylkou $\pm 0,2$ V/m. Obě použité metody dobře postihují rezonanční chování dutiny.
- 5) V případě srovnání absolutní hodnoty intenzity elektrického pole $|E_{tot}|$ (Obr. 29) měřené virtuální sondou při expozici horizontálně polarizovanou rovinnou vlnou dosahují obě numerické metody velmi vysoké shody s maximální odchylkou $\pm 0,05$ V/m. Stejně jako u analýzy při expozici z čela modelu, i zde usuzujeme, že rozdíl je způsoben chybou aproximace e_x použité numerické metody (MoM). Pomocí momentové metody jsme získali v intervalu zkoumaných frekvencí celkem 136 bodů s vypočtenou intenzitou elektrického pole, oproti 1 001 bodům získaným pomocí FDTD. Momentová metoda tak neumožnila postihnout jemné odchylky intenzity elektrického pole, což ovšem není i zde v celkovém výsledku rozhodující.

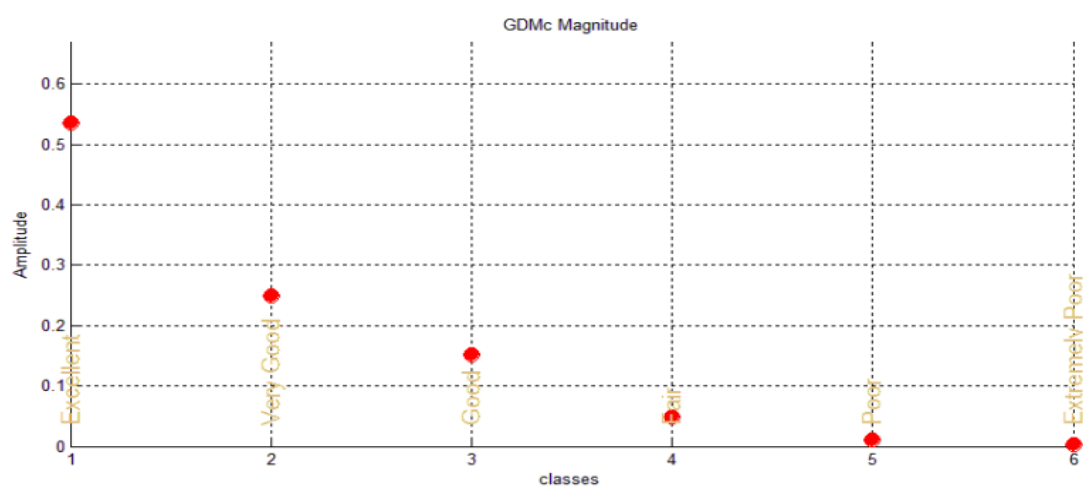
Srovnání výsledků numerických simulací provedeme kromě tradičních metod uvedených výše také pomocí metody FSV. Cílem tohoto porovnání je posouzení, jak velkou míru shody dosáhnou výsledky získané pomocí EMC Studia a CST MWS, v oblasti ADM, FDM a GDM. jednotlivých grafech je četnost výskytu bodů spadajících do určité skupiny shody dle měřítka FSV uvedena červenými body, kdy celkový počet výskytů je roven 1. Porovnání budeme provádět pro všechny čtyři konfigurace testovacího modelu. Následně vyjádříme míru shody tohoto objektivního hodnocení s výše uvedeným prostým porovnáním.



Obr. 30 – ADM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.

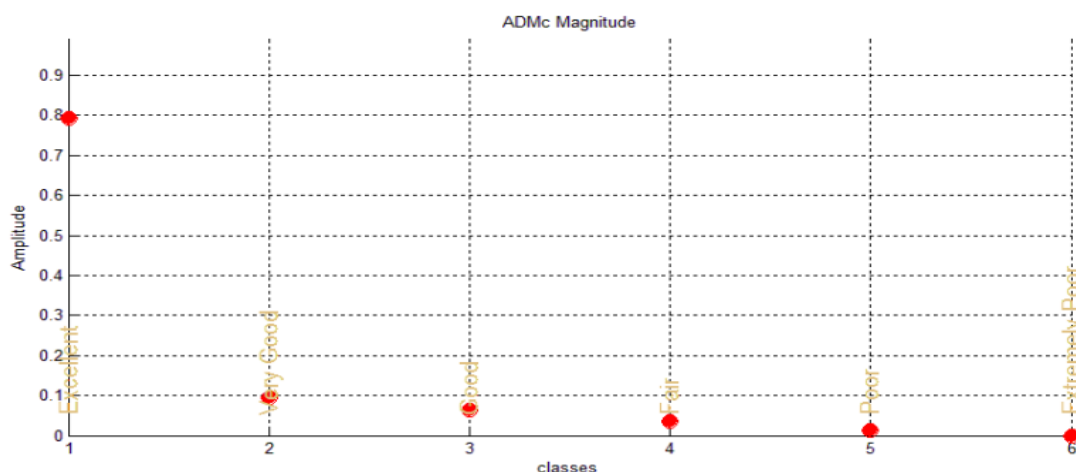


Obr. 31 – FDM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.

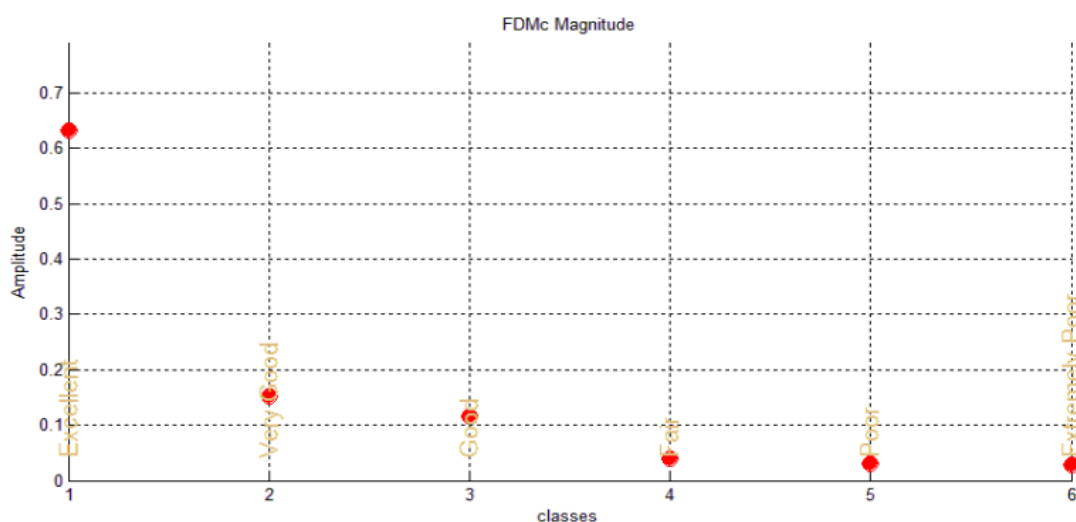


Obr. 32 – GDM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.

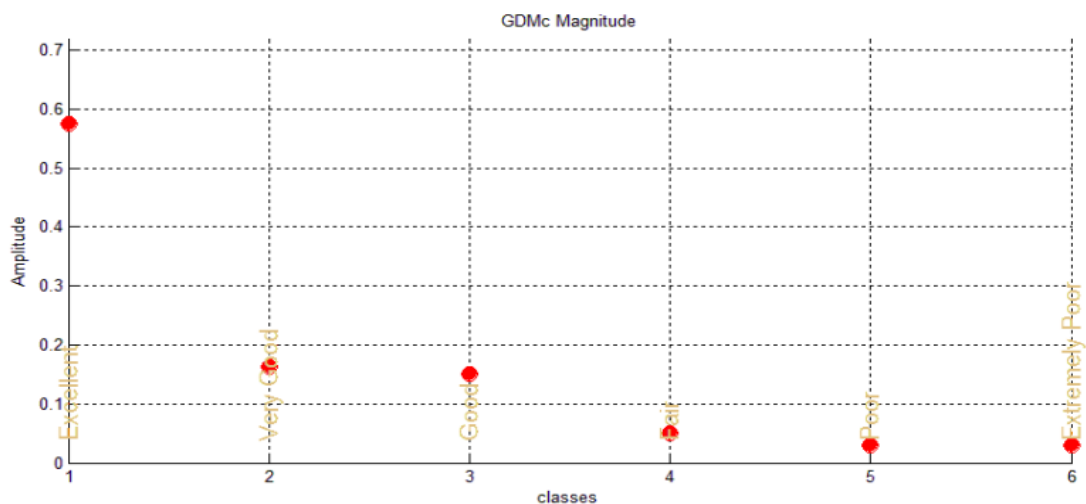
Z výše uvedených výsledků FSV vyplývá, že shoda obou numerických metod je v případě expozice testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou excelentní až velmi dobrá. Excelentní shody bylo dosaženo zejména při hodnocení ADM (Obr. 30), z čehož vyplývá, že složky amplitudy byly oběma metodami simulovány téměř úplně shodně. Velmi dobrého výsledku bylo dosaženo z pohledu FDM (Obr. 31), kdy shoda výsledků je excelentní a velmi dobrá, ovšem nižší než v případě ADM. Z toho vyplývá, že lokalizace rezonančních fenoménů není zcela shodná, ovšem stále zůstává velmi dobrá. Míra celkové shody GDM (Obr. 32) je pak obrazem výsledků ADM a FDM.



Obr. 33 – ADM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.

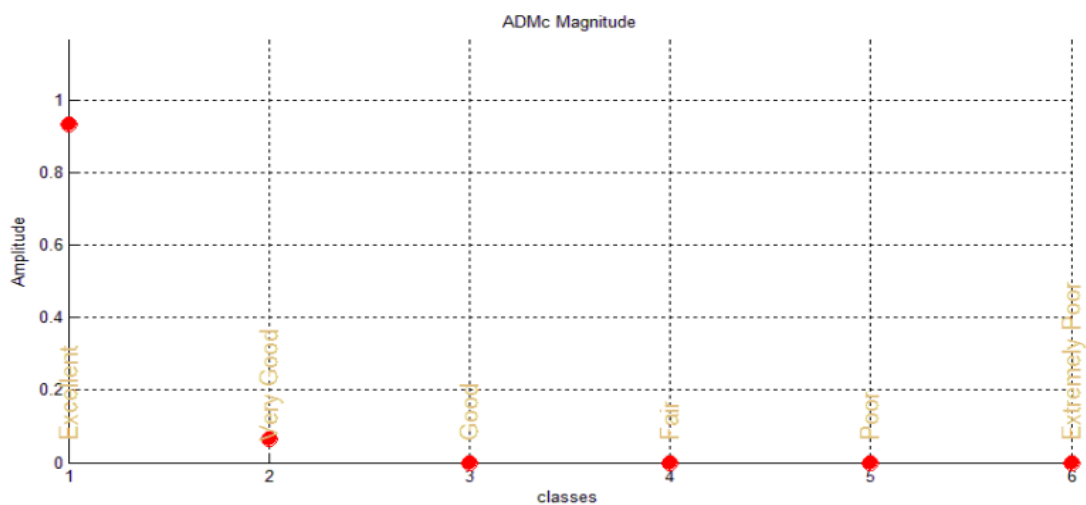


Obr. 34 – FDM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.

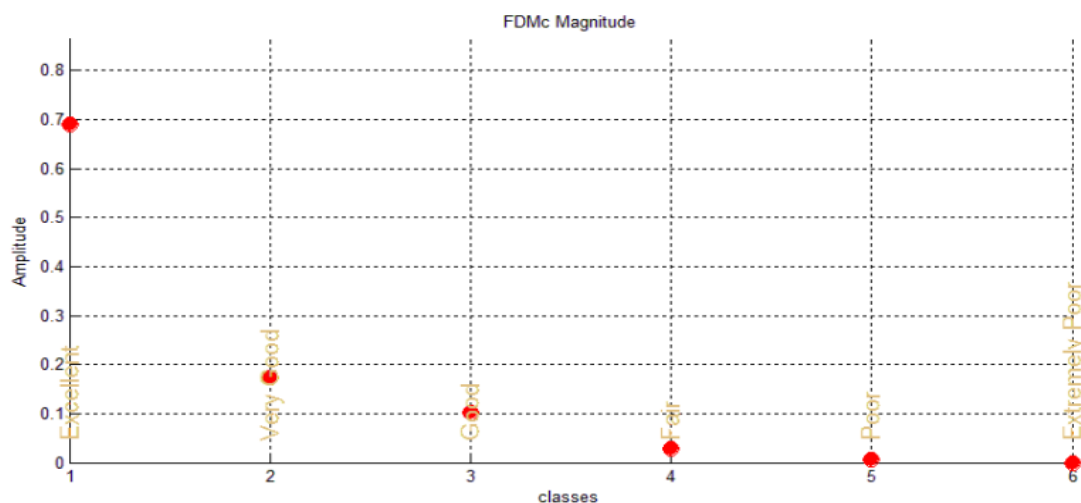


Obr. 35 – GDM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.

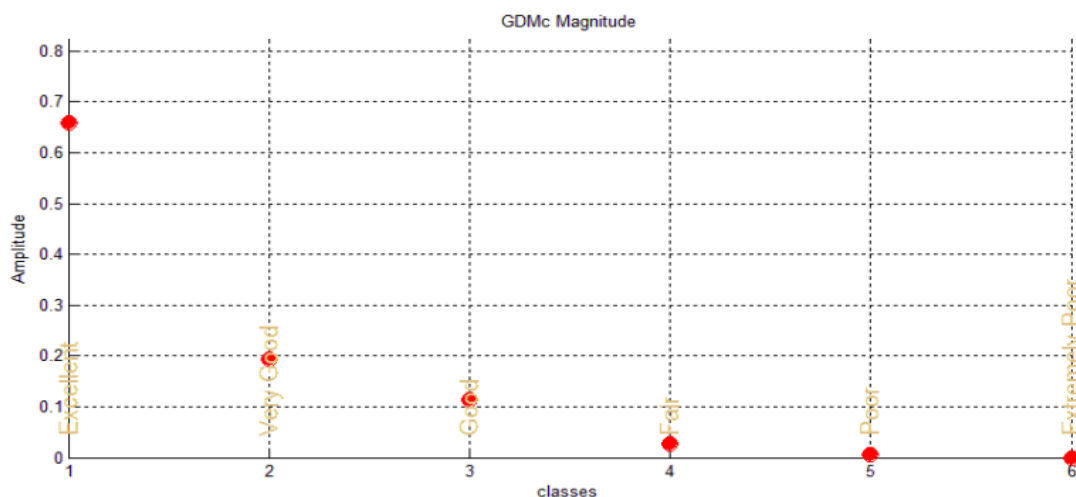
Srovnání pomocí FSV metody v případě expozice testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou dosáhlo obdobných výsledků jako v předchozím případě, pouze s lepším hodnocením FDM. Hodnocení ADM (Obr. 33) je excelentní, FDM (Obr. 34) excelentní až velmi dobré, z čehož vyplývá stejné i hodnocení GDM (Obr. 35) jako excelentní až velmi dobré. Znamená to lepší shodu rezonančních fenoménů popsanych oběma metodami, při zachování excelentního hodnocení shody amplitud.



Obr. 36 – ADM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou.

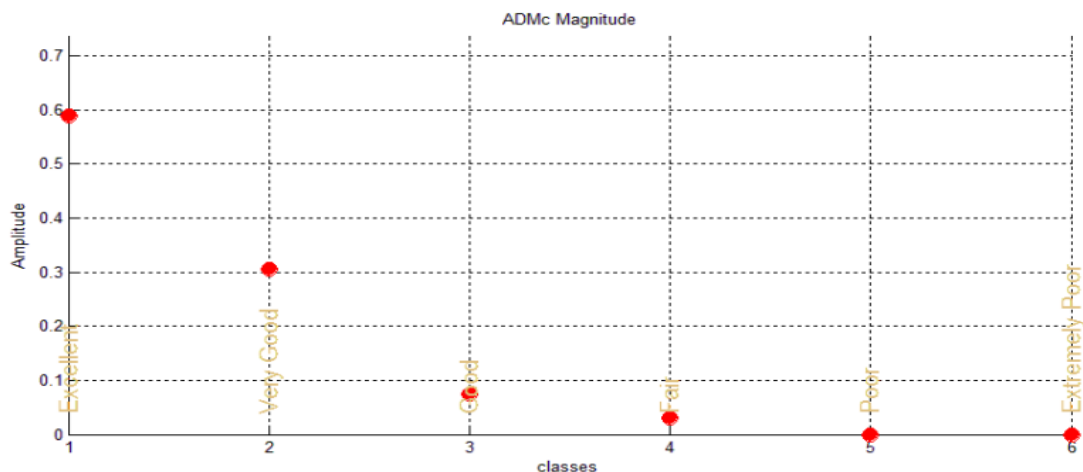


Obr. 37 – FDM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou

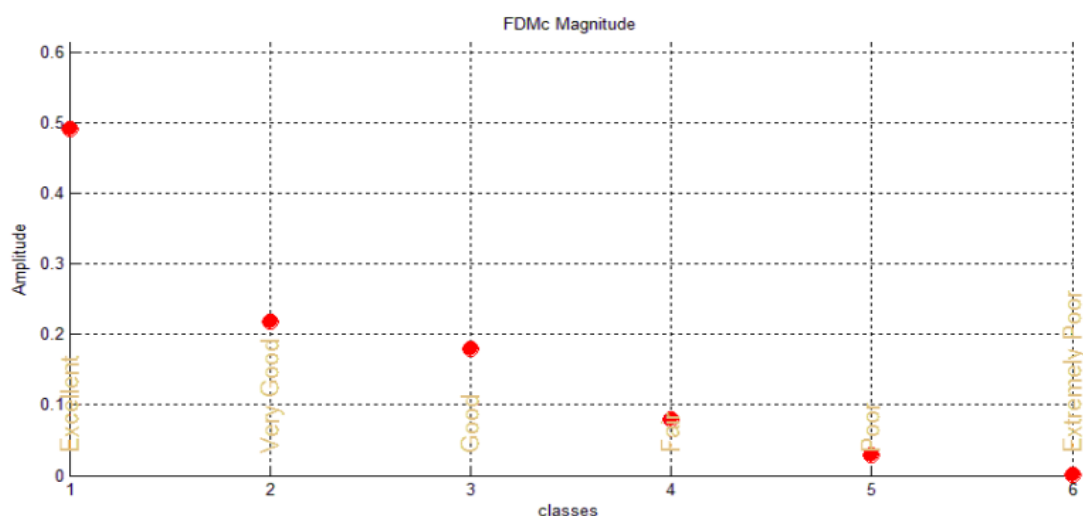


Obr. 38 – GDM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou

Rovněž srovnání výsledků (Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38) při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou přineslo excelentní shodu ve všech sledovaných parametrech. Projevuje se tak správná funkce obou testovaných metod správným způsobem stanovit vazbu vnitřního prostředí rezonátoru na prostředí vnější, skrze komplikovanou dutinu s více vazebními otvory.

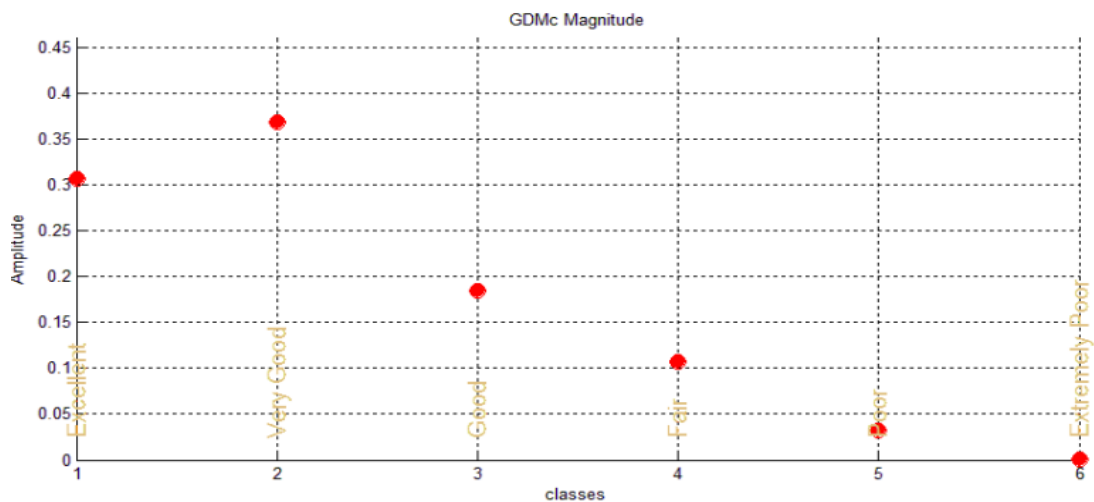


Obr. 39 – ADM při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou.

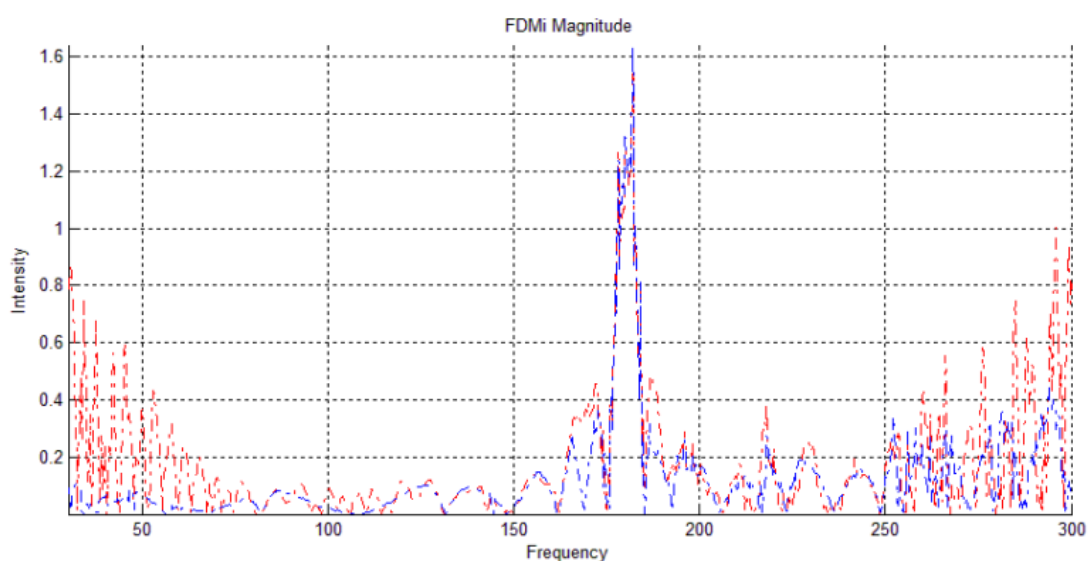


Obr. 40 – FDM při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou.

Ze čtveřice porovnávaných výsledků dosáhly ty, které byly získány při expozici modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou, nejnižšího hodnocení shody. Hodnota ADM (Obr. 39) sice zcela odpovídá předchozím porovnáním pro ostatní konfigurace, ale hodnota FDM (Obr. 40) se již výrazně odchyluje. Při pohledu na průběh intenzit porovnávaných polí v oblasti FDM (Obr. 42) je zřejmé, že v oblastech na začátku (cca 30 - 50 MHz) a na konci pásma (cca 270 – 300 MHz) nejsou EMC Studiem popisovány jednotlivé frekvenční špičky v oblasti FDM, související s vazbou pole do vnitřního prostředí testovacího modelu. Tento fenomén také pravděpodobně souvisí s podstatně řidším krokem analyzovaných frekvencí, který činí v případě EMC Studia 2 MHz, v případě MWS pouze cca 0,3 MHz. Tato situace upozorňuje na případné problémy, které může EMC Studio v případě širokého frekvenčního kroku mít. Je nutno proto při jeho použití s touto situací počítat a zvolit správný frekvenční krok.



Obr. 41 – GDM při expozici testovacího modelu z leva horizontálně polarizovanou vlnou.



Obr. 42 – Frekvenční průběh FDMi při expozici testovacího modelu z leva horizontálně polarizovanou vlnou. Červeně označeny výsledky získané pomocí CST, modře pomocí EMC Studia.

Při porovnání výsledků pomocí běžných metod (Obr. 19, Obr. 20 a Obr. 28, Obr. 29) a pomocí objektivní validační metody FSV (Obr. 32, Obr. 35 a Obr. 38, Obr. 41) můžeme dojít k závěru, že výsledky, které se zdály být ve velmi dobré shodě, v této shodě při pohledu z různých úhlů pohledu ve skutečnosti být nemusí. Zejména analýza FDM ukázala, že některé rezonanční fenomény nemusí být oběma metodami popsány stejně, i když to tak na první pohled při běžném srovnání vypadá.

Potvrdil se též předpoklad, že metoda FSV umožňuje objektivní porovnání dvou souborů výsledků, při relativně nízké složitosti tohoto úkonu (pro validaci byl vytvořen jednoduchý nástroj aplikující popsané principy FSV). V další části práce budeme používat již výhradně tohoto srovnání, tedy pomocí metody FSV.

Jako poslední provedeme prosté vizuální srovnání rozložení intenzity elektrického pole ve stanovených řezných rovinách. Výsledky byly dosaženy v rámci výpočtu intenzity elektrického pole pro virtuální sondu, proto zůstávají parametry simulace i modelu zcela totožné. Srovnání provedeme na frekvencích, které se ukázaly jako rezonanční pomocí obou numerických metod a navíc se blíží k teoretickým poznatkům získaným v kapitole 2.2.1. Jedná se o frekvence:

- 1) 94 MHz,
- 2) 148 MHz,
- 3) 186 MHz,
- 4) 288 MHz.

Pro tyto kmitočty byly dle obrázků (Obr. 8, Obr. 9 a Obr. 10) stanoveny řezné roviny, ve kterých budeme graficky jednotlivé složky E_x , E_y a E_z zobrazovat. Z důvodu rozdílnosti jednotlivých výpočetních nástrojů a zejména jejich způsobu post-processingu jsou v případě EMC Studia roviny označeny jako X, Y a Z, v případě CST MWS MWS XZ, YZ a XY. Vzhledem k rozsahu získaných dat jsou tato umístěna v příloze této práce na CD, kde se nacházejí řezy postihující rozložení intenzity pro expozici z čela vertikálně polarizovanou vlnou, získané pomocí obou simulačních metod. Analýzu této jedné konfigurace považujeme za dostatečnou pro prokázání spolehlivé funkce dané výpočetní metody. Na tomto místě stanovíme poznatky plynoucí z provedeného experimentu.

- 1) Jednoznačně se potvrzuje předpoklad, že dominantní složkou celkové intenzity elektrického pole při expozici modelu vertikálně polarizovanou vlnou z čela je složka E_z . Tohoto výsledku se podařilo dosáhnout pomocí obou numerických metod.
- 2) Rozložení jednotlivých složek intenzity elektrického pole dosahuje tím vyšší shody, čím větší je příspěvek dané složky do celkové intenzity elektrického pole. Znamená to tedy, že výsledky dosažené pro E_z v případě expozice vertikálně polarizovanou vlnou jsou ve vysoké shodě. Shoda v případě složek E_x a E_y by se dala označit jako uspokojivá.
- 3) Do maximální řešené frekvence 288 MHz nepozorujeme frekvenční závislost shody výsledků.
- 4) V absolutní hodnotě jsou výsledky získané pomocí obou metod ve velmi dobré shodě. Je proto pro další výpočty z hlediska přesnosti možno použít libovolnou z testovaných metod. Z praktického hlediska by bylo možno doporučit spíše nástroj CST MWS z důvodu mnohem jednodušší a přesnější interpretace dat získaných při simulaci – lépe zpracovaný modul post-processingu.

2.2.4. SHRNUÍ KAPITOLY

V předchozí kapitole jsme podrobně verifikovali dostupné výpočetní metody, pomocí kterých budeme dále řešit problémy související s expozicí vozidel elektromagnetickým polem. V kapitole 2.2.1 jsme provedli analýzu Slaterovy poruchové metody umožňující matematický popis kvality rezonátoru, za který můžeme vnitřní dutinu jak testovacího modelu, tak i karoserie vozidla považovat. Definovali jsme také základní matematické vztahy pro první přiblížení k výpočtu vlastních rezonančních frekvencí této dutiny.

Na základě získaných teoretických poznatků jsme v kapitole 2.2.2 navrhli testovací model o základních rozměrech $x = 1\,450\text{ mm}$, $y = 1\,780\text{ mm}$, $z = 980\text{ mm}$, respektující skutečné rozměry vnitřní dutiny vozu Škoda Octavia, sloužící k následnému ověření správnosti uvažovaných numerických metod řešení MoM a FDTD, aplikovaných v prostředích EMC Studio a CST MWS. U tohoto modelu jsme z důvodu zjednodušení zanedbali zakřivení střechy, předního a zadního okna daná reálným tvarem karoserie, neboť do kritické frekvence 300 MHz, která je zde uvažována jako hraniční, nemají tyto tvary na rozložení elektrického pole vliv. Naopak bylo nutno podrobně analyzovat a navrhnout vhodný rozměr otvorů v rezonátoru. Prostor pro okna byl tak nahrazen otvory o rozměrech $400 \times 1\,200\text{ mm}$ v případě čelního a zadního okna a $400 \times 690\text{ mm}$ v případě bočních oken. Tyto otvory na uvažovaných kmitočtech zásadním způsobem ovlivňují kvalitu rezonátoru a posouvají teoreticky uvažované rezonanční frekvence.

V kapitole 2.2.3 jsme provedli ověření shody obou numerických metod při výpočtu rozložení intenzity elektrického pole jednak v řezných rovinách vedených modelem, tak i pomocí virtuální sondy elektrického pole. Došli jsme k závěru, že obě použité numerické metody dosahují dobré shody výsledků. Předpokladem je ovšem správná definice rozměrových a materiálových parametrů testovacího modelu a způsobu jeho buzení.

Dospěli jsme rovněž k závěru, že při expozici testovacího modelu vertikálně polarizovanou vlnou z čela je hlavní příspěvek celkové intenzity elektrického pole E tvořen složkou E_z . Ostatní složky E_y a E_x mají v této situaci pouze okrajový vliv. Tento pozorovaný jev odpovídá teoretickým předpokladům, neboť právě ve směru osy Z měřící sondy kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} přicházející rovinné vlny. Obdobně při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou tvoří hlavní příspěvek $|E_{tot}|$ složka E_y , neboť stejně jako v předchozím případě kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} právě ve směru osy Y měřící sondy. Shodných poznatků jsme dosáhli i pro expozici testovacího modelu z boku, více v kapitole 2.2.3. Obě numerické metody tak správně reprodukovují základní poznatky z oblasti šíření vlny v dutinovém rezonátoru.

Provedli jsme rovněž objektivní porovnání výsledků pomocí metody FSV s velmi dobrým výsledkem, ukazujícím jak dobrou shodu výsledků obou numerických metod, tak praktičnost a funkčnost dané metody. Na základě tohoto zjištění budeme dále metodu FSV používat jako výchozí pro porovnání výsledků numerických simulací s předcertifikačními i certifikačními měřeními.

2.3. PŘÍPRAVA SIMULAČNÍCH MODELŮ

Cílem hodnotné EMC simulace je přinést důležité informace pro vývojový proces výrobku, a proto musí být vhodně začleněna do jeho postupného vývoje. Příprava simulačního modelu proto musí být efektivní a dostupná v řádech několika hodin, nikoliv dní či měsíců. Je tedy nezbytné nalézt synergii mezi EMC odděleními a útvary zabývajícími se konstrukcí vozu a CRASH modelováním, kde lze s výhodou základní modely vozů získat. Mezi běžné výpočty, prováděné těmito útvary, patří statické a dynamické pevnostní výpočty, výpočty pnutí a deformací, často s využitím FEM metod.

Získaný analytický CAD model není ovšem ve své původní podobě vhodný pro numerické výpočty EMC a vyžaduje rozsáhlé úpravy, viz dále. Z kapitoly 2.1 víme, že pro řešení povrchových proudů tekoucích po karoserii a výpočty polí rozsáhlých systémů budeme používat Momentovou metodu (MoM). Vzhledem k hustotě matice, která by měla být řešena, musí být počet neznámých mnohem nižší než v případě FEM simulací. Použitelný model by pak měl obsahovat mezi 10 000 až 50 000 trojúhelníkovými elementy.

Redukování počtu elementů a přitom zachování všech důležitých parametrů je časově náročný a komplexní úkol, který přitom musí být proveden v co nejkratším čase, vzhledem k vývoji výrobku, který má modelovat. Při úpravách modelu můžeme narazit na následující aspekty:

1) Extrémní nadbytečnost dat původního modelu

Je nutno si uvědomit, že model, ze kterého budeme při přípravě modelu pro EMC zkoušky vycházet, je velmi komplexní a slouží k jinému účelu než EMC simulaci. Z tohoto důvodu obsahuje velký počet zcela zbytečných částí (detaily šroubových spojení, úchytek, lemů), které je nutno významně redukovat. Míra redukce závisí na účelu použití námi žádaného modelu. Obecně je vhodné zachovat základní geometrii objektu (v našem případě karoserii automobilu), ale důkladně zvažovat popis jeho detailů a vložených dílů.

2) Odstraňování nadbytečných povrchů

V návaznosti na předchozí bod je před přípravou hrubého modelu vozu nezbytné rozhodnout, které povrchy budou považovány za nadbytečné z elektrodynamického pohledu. Jedná se zejména o malé otvory a části s velikostí menší než cílová velikost buňky výpočetní sítě ($\lambda_{MAX}/10$). Tyto prvky musí být eliminovány (nahrazeny plochou, nebo v případě otvorů zaslepeny). Dále je vhodné zaměřit se na části zcela obklopené jinými povrchy a tyto odstranit.

3) Dělení modelu

Ve většině případů je vstupní model příliš komplexní a pro vytvoření hrubšího modelu v jednom kroku by byly velmi lehce překročeny možnosti dostupných výpočetních prostředků. K překonání těchto problémů je velmi vhodné model rozdělit podle funkčních celků do jednotlivých částí. Po vytvoření všech dílčích zjednodušených částí (např. karoserie, dveře, víko zavazadelníku, výztuhy v kokpitu, sedačky atd.) jsou tyto části složeny do celého modelu, který je pak možno využít. Díky tomuto přístupu můžeme později získat velmi variabilní model tvořený jednotlivými fyzickými částmi vozu, které mohou být volně využívány při různých požadavcích na simulaci.

4) Požadavky na velikost sítě modelu

Zejména v případě simulací vlivu kabelových svazků, antén a řídicích jednotek nemusí vždy základní velikost elementu sítě dostačovat. Je nutno proto uvažovat lokální zjemnění modelu karoserie vozu za účelem zvýšení přesnosti výpočtu. Aby nebylo nutné zvyšovat počet prvků modelu v celém jeho povrchu, je možno využít lokální zjemnění modelu pouze v místech, kde se nachází analyzovaný prvek, tzv. sub-meshing.

5) Korekce chyb

Při redukci počtu prvků sítě užívaných modelů, které vznikají transformací z rozsáhlých FEM modelů, dochází k řadě chyb. Vstupní data pak musí být opravena manuálně, nebo lépe vhodným výpočetním algoritmem, viz dále. Nejčastěji můžeme objevit následující vady modelu: nadbytečné elementy, prvky se špatnou kvalitou (chybný popis povrchu), nebo volné elementy, které nejsou do sítě zapojeny.

6) Výsledný model

Výsledný model vozu je v našem případě reprezentován hrubou trojúhelníkovou sítí. Pokud vezmeme v úvahu obecně platnou podmínku ($\lambda_{MAX}/10$) pro stanovení velikosti elementu sítě a maximální frekvence, na které můžeme model tvořený těmito prvky použít, je například při velikosti elementu 4 cm horní frekvenční limit pro použití modelu 750 MHz, což může být pro mnoho výpočtů zbytečně vysoký hraniční kmitočet. Pro rychlé výpočty na různých frekvencích je proto velmi vhodné vytvořit více modelů s různou velikostí prvků, a tedy různými maximálními frekvencemi, do kterých může být model použit, při zachování jejich maximální jednoduchosti.

Uvedený výčet rozhodně nepostihuje veškeré problémy, na které je možno při přípravě modelu pro EMC účely narazit. Specifickou skupinu dílů tvoří pohyblivé součásti (např. mechanismus posuvu volantů a sedaček). Tyto partie jsou z hlediska geometrické reprezentace velmi obtížně popsitelné a je nezbytné zvážit, zdali musí nutně tvořit součást modelované struktury, nebo mohou být nahrazeny zjednodušeným modelem.

Obecně můžeme říci, že cílem úpravy by měla být náhrada zjednodušeným geometrickým ekvivalentem, který ovšem dostatečně přesně reprezentuje chování dané části z pohledu rozložení povrchových proudů a elektromagnetického pole. Usoudíme-li, že daná součást je pro potřeby simulační úlohy nevýznamná, je nejlepším řešením ji z modelu vynechat.

Neméně důležitou součástí při přípravě modelu je dobrá znalost cílového simulačního prostředí a jeho specifik. Jedná se zejména o způsoby reprezentace sítě, sub-meshing a způsoby aproximace tenkých drátových vodičů (zejména při modelování antén ve skleněných strukturách). Dalším aspektem je pak interpretace kabelových svazků uvnitř modelu. Zde dochází ke zvýšenému riziku kolize svazku s geometrií modelu.

V rámci výše uvedených modifikací je nutné dodržet zejména následující obecně platná pravidla [40]:

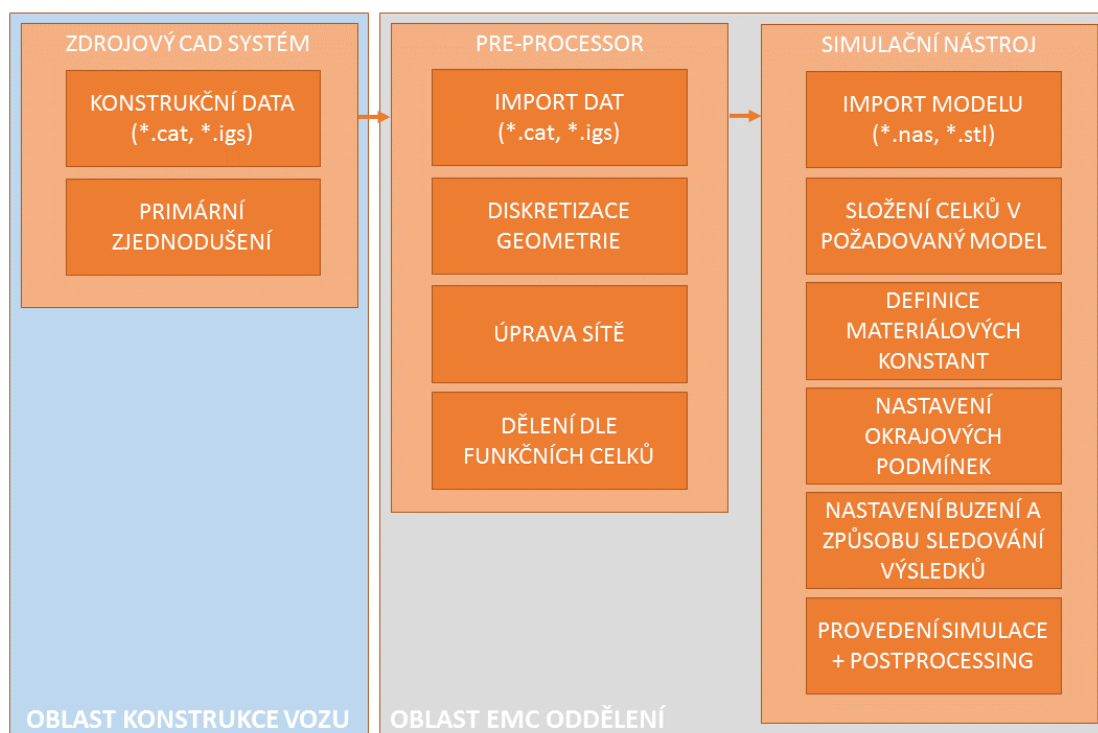
- 1) Zachování mezer mezi významnými pohyblivými částmi: Toto pravidlo je důležité především u metod typu FDTD, kde není možnost popisu dané partie pomocí sub-cell modelování a vzdálenost mezi danou partií a zbytkem konstrukce je menší než jedna buňka uvažované výpočetní sítě ($< \lambda_{MAX} / 10$). Jedná se zejména o vztah karoserie vozidla – dveře – víka.
- 2) Interpretace částí s malou tloušťkou a malých otvorů: prvky geometrie, které jsou menší než cílová velikost buňky výpočetní sítě ($< \lambda_{MAX} / 10$), by měly být odstraněny, resp. nahrazeny plošnou reprezentací či zaslepeny.
- 3) Trasy kabelů nad vodivou plochou konstrukce: Hlavním cílem je zajištění, aby trasa kabelu po finální diskretizaci nekolidovala s geometrií modelu. Dalším důležitým cílem je zabránit, aby trasa kabelu nebyla k vodivé konstrukci blíže než cca ($< \lambda_{MAX} / 10$) - kompromis pro metody se sub-cell technikou. Obecně je nutné situovat trasu kabelu nad vodivou plochu do takové výšky, abychom byli schopni zajistit dostatečně realistické rozložení vytvořeného náboje mezi nimi.

Pro realizaci úkonů nezbytných k přípravě geometrie simulačního modelu můžeme zvolit následující cesty:

- 1) Oprava geometrie v pre-procesoru koncového simulačního programu: Tuto variantu, pokud to dotýčný program vůbec dovoluje, lze použít zejména v případech, kdy geometrie modelu vykazuje pouze elementární a sporadické chyby. V opačném případě je řešení tohoto druhu problémů skrze ni velmi náročné, nebo zcela nemožné.
- 2) Oprava geometrie ve zdrojovém CAD programu: Za určitých okolností může tato varianta představovat ideální řešení, ovšem podmínkou je jasné identifikování příčiny, která dané problémy způsobila. Jedině tak budeme schopni ve zdrojovém programu tyto problémy odstranit. Identifikace příčiny však nemusí být triviální.
- 3) Převod či oprava geometrie pomocí externího systému (externího pre-procesoru): Toto řešení patří k jednomu z nejvíce používaných (zejména pak v oblasti průmyslového vývoje). V dnešní době je již možné nalézt celou řadu specializovaných softwarů / modulů, které jsou přímo vytvořeny za účelem co nejméně problematického převodu komplexních geometrických dat mezi různými systémy a jejich následným automatickým / poloautomatickým čištěním či editací. Jejich nevýhodou je značná finanční náročnost, výhodou pak značné rozšíření možností, jak úspěšně a co nejrychleji vyvstálé problémy vyřešit.

Nevýhodou tohoto přístupu k modelu je ovšem jeho záměrné přiblížení k nástroji, ve kterém bude řešen. Model tak ztrácí svoji univerzálnost a jednoduchou použitelnost v jiných simulačních nástrojích. Lehce tak můžeme dosáhnout situace, kdy z důvodu nutnosti verifikace výsledků získaných v jednom simulačním prostředí budeme muset přepracovat již dostupný model tak, aby jej bylo možno využít i v jiném prostředí. Tato nevýhoda je ale dostatečně kompenzována jednoduchostí při běžném sériovém nasazení řešení numerických problémů, kdy je nutnost nezávislé verifikace zavedeného a ověřeného postupu minimální.

Komplexní tok dat procesem jejich získání a úpravy je možno vidět na obrázku (Obr. 43). Nákres popisuje obecný průběh získání a úpravy dat, včetně rozdělení kompetencí mezi jednotlivé složky vývojového procesu.



Obr. 43 – Posloupnost toku simulačních dat procesem jejich přípravy pro účely numerické simulace. Předpokládáme získání konstrukčních dat (např. pro CRASH simulace), jejich zpracování externím pre-procesorem a využití v simulačním nástroji (např. EMC Studio).

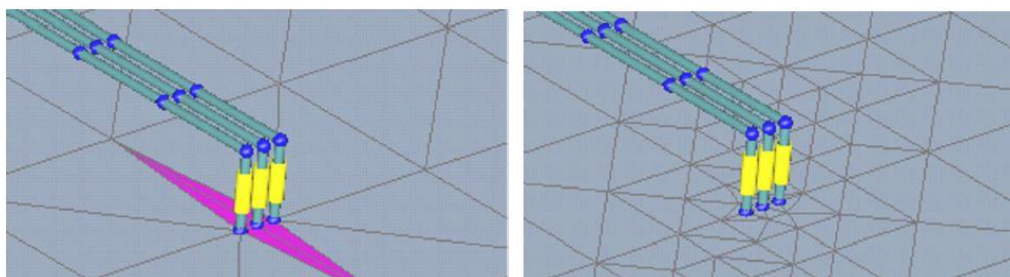
V ideálním případě je vhodné rozdělit tvorbu a zpracování modelu mezi dvě základní organizační složky vývojového týmu. Konstrukční oddělení dodá model již po primárním zjednodušení, což významným způsobem zkracuje čas nutný pro konečnou úpravu modelu pomocí pre-procesoru. Vlastní zpracování a provedení simulace pak samozřejmě spočívá v oblasti EMC, která je pro tyto úkoly vyčleněna.

2.3.1. PROBLEMATIKA DISKRETIZACE SÍTĚ

Při přípravě numerického modelu se můžeme setkat s řadou problémů, které mohou zapříčinit zcela nereálný výsledek numerické simulace, nebo významným způsobem poškodit jeho přesnost. Pro zajištění odpovídající kvality modelu na základě poznatků [83] a vlastních zkušeností získaných při realizaci této práce stanovíme základní pravidla pro diskretizaci modelu.

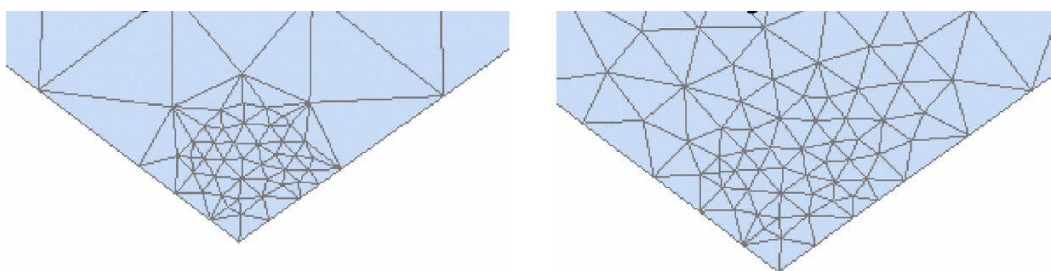
- 1) Nejdůležitějším pravidlem je respektování fázově závislých distribucí proudů a nábojů podél struktury modelu, kde je dominantním parametrem frekvence. Dostupné numerické metody dosahují dobrých výsledků, pokud základní elementy diskretizační sítě (hrana trojúhelníkového segmentu sítě nebo část prutu antény) nejsou delší než $1/10$ minimální uvažované vlnové délky.

- 2) Blízko hran modelu a dutin pozorujeme vysoký gradient proudu a náboje. Z tohoto důvodu je pro věrohodný popis vhodné v těchto místech použít lokálně vyšší hustotu diskretizace, překračující základní podmínku ($< \lambda_{MAX} / 10$).
- 3) V ideálním případě by měly mít trojúhelníky diskretizační sítě téměř identické délky jednotlivých hran. Tato podmínka je v praxi ovšem obtížně splnitelná. Uvažujeme proto hraniční poměr 1:5, který vyjadřuje, že nejkratší hrana trojúhelníku může být maximálně 1/5 hrany nejdelší. Při porušení těchto podmínek již není zaručena očekávaná přesnost výpočetní metody. Pokud není možno při modelování určitých prvků tohoto poměru dosáhnout, je nezbytné volit menší velikost diskretizační buňky.
- 4) V sousedství drátěných struktur, jež jsou blízko k povrchu modelu, nebo jsou k němu přímo připojeny, pozorujeme stejně jako na hranách vysoký gradient proudu a náboje. Stejně jako v předchozím případě i zde doporučujeme zvýšit hustotu diskretizační sítě nad doporučenou hodnotu 1/10 (viz Obr. 44). Délka hrany trojúhelníkového segmentu nacházejícího se pod vodičem by měla být maximálně stejně dlouhá jako výška tohoto vodiče nad povrchem.



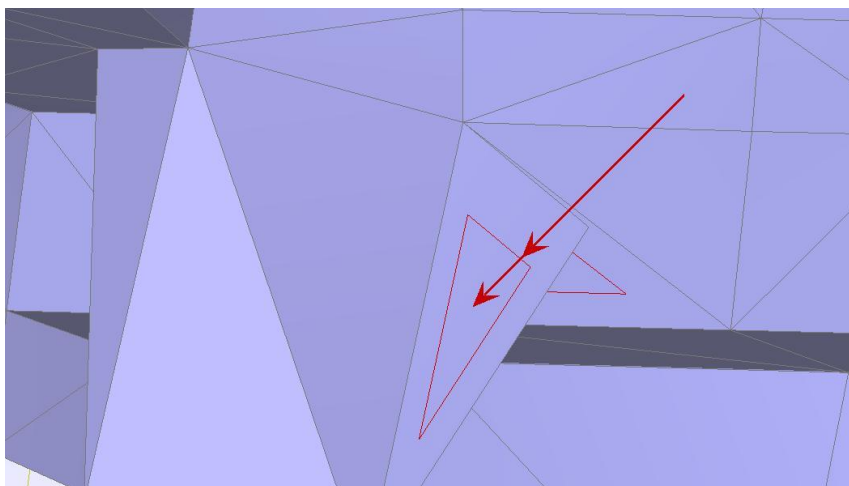
Obr. 44 – Příklad chybného (vlevo) a správného (vpravo) připojení vodičů k povrchu modelu.

- 5) Sousedící trojúhelníky nebo segmenty by obvykle měly mít stejné lineární rozměry. Pokud je nutno použít v blízkosti velké i malé segmenty najednou, je nutné zajistit gradientní přechod mezi těmito prvky - nejčastěji v oblasti s lokálně zvýšenou hustotou sítě (viz Obr. 45).



Obr. 45 – Příklad chybně (vlevo) a správně (vpravo) provedeného gradientního přechodu mezi malými a velkými prvky diskretizační sítě.

- 6) Pro drátové segmenty stanovujeme poměr mezi délkou a průměrem (včetně tloušťky opláštění) na 3. Z toho vyplývá, že délka segmentu by měla být alespoň 3x větší než jeho průměr.
- 7) Během tvorby geometrického modelu musíme zajistit, aby se drátěné nebo trojúhelníkové segmenty navzájem nepřekrývaly (viz Obr. 46), neprotínaly a byly připojeny skrze společné koncové body (nodes).



Obr. 46 – Překrývající se segmenty na modelu vozu Škoda Roomster.

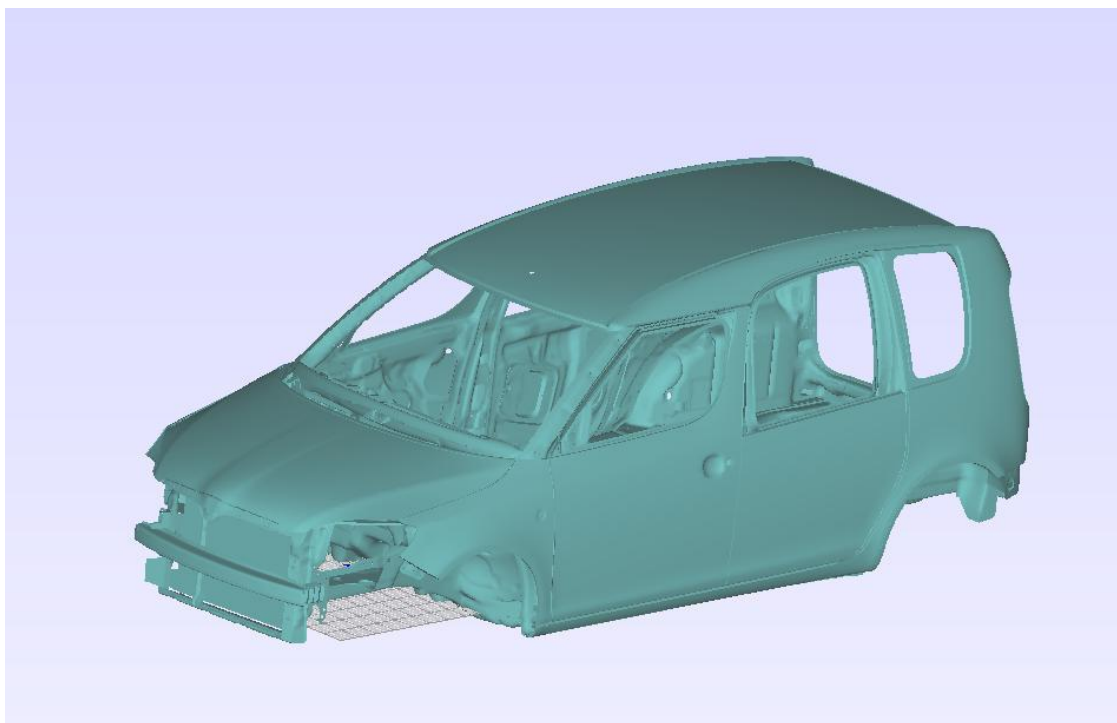
- 8) Pokud připojujeme drátěný objekt k povrchu modelu, musí být zajištěno jeho připojení do vrcholu povrchového objektu. V opačném případě nebude zajištěn průtok proudu tímto spojením.
- 9) Pokud připojujeme k sobě dva různé povrchy, musí být zajištěn správný průchod proudu z povrchu na povrch. Toto připojení vyžaduje společnou hranu. Je tedy nezbytné, aby sousedící trojúhelníkové segmenty měly společné hrany.
- 10) V případě spojování drátěných objektů musí být pro správný průchod proudu zajištěno jejich spojení v jednom bodě (node), nikoliv na vedení.
- 11) Během modelování dielektrických vlastností pomocí trojúhelníkových segmentů, tloušťka těchto segmentů by neměla být příliš vysoká v porovnání s délkou jejich hran – ne více než v poměru 1:5.

2.3.2. ASPEKTY ZÍSKÁNÍ SIMULAČNÍCH MODELŮ VOZŮ

V dnešní době je v automobilovém průmyslu k dispozici velké množství počítačových modelů, určených zejména pro konstrukční účely, či jiné fyzikální výpočty. Jedná se o modely naprosto přesné, obsahující i nejmenší detaily karoserie, agregátu, převodových skříní a náprav, ale i vnitřního vybavení vozu. Pro zástavbové účely existují modely palubních svazků a umístění řídicích jednotek. Všechny tyto modely mohou být za určitých podmínek využity pro potřeby simulací předcertifikačních testů elektromagnetické odolnosti. Následující kapitola se proto bude věnovat procesům jejich získání a problémům, které je přitom nutno překonat.

Bylo zjištěno, že jako nejvhodnější zdroj simulačních dat mohou v automobilovém průmyslu posloužit modely používané pro CRASH testy. Tyto modely jsou tvořeny prvky s velikostí cca 7 mm a i při použití pouhé karoserie automobilu (viz Obr. 47) mají přes 100 milionů prvků sítě, což klade naprosto extrémní požadavky na výpočetní výkon a činí to model s takovým množstvím detailů naprosto nepoužitelným. Je proto nezbytné takovýto model dle zásad uvedených v kapitole 2.3 zjednodušit.

Vynecháním nepodstatných prvků a zvýšením nejmenší velikosti jednotlivých segmentů sítě (Mesh). K tomuto účelu je využit nástroj ReMesh.

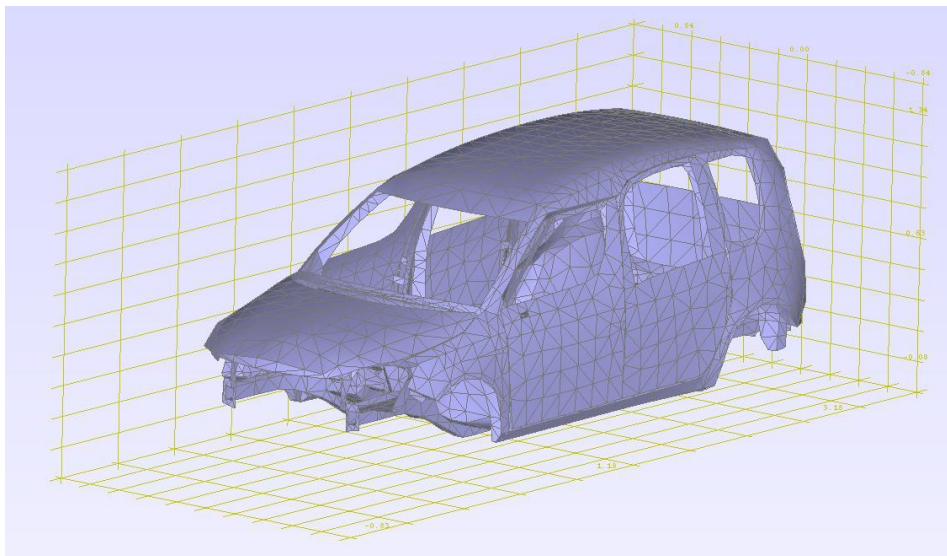


Obr. 47 - Detaily karoserie vozu Škoda Roomster pro model s velikostí prvku sítě 7mm.

V případě použití modelu s prvky o velikosti 40 mm je celkový počet elementů 36 331. V takovém modelu byly zanedbány veškeré nekovové součásti (zejména nárazníky a skleněné výplně) a také kompletní pohonná jednotka včetně výfukového potrubí a náprav. Předpokládáme, že vliv těchto součástí je pro výpočet rezonancí vznikajících uvnitř vozu (neuvažujeme motorový prostor) zanedbatelný. I přesto je pro výpočet nárokováno 45 316 MB paměti RAM a doba výpočtu je odhadována téměř na 43 hod⁷ pro výpočet jedné frekvence. Z tohoto důvodu se jeví použití i toho velmi zjednodušeného modelu (oproti modelům určeným pro crash-testy) jako nereálné.

U modelu s velikostí prvků 80 mm byly oproti předchozím modelům dále zanedbány detaily vnější karoserie: neodpovídají geometrické tvary otvorů pro kliky a víčko nádrže. Zjednodušeny byly vzhledem k jejich šířce vnitřní podlahové nosníky a sloupky A, B i C. Model je tvořen 15 788 prvky a operační paměť alokovaná pro výpočet činí 8 557 MB. Doba výpočtu pro jednu frekvenci je odhadována na 3,5 hod. Tyto výsledky činí model použitelným pro přesnější výpočty. Vzhledem k odhadované době simulace ovšem model nevyhovuje pro první přiblížení. Je proto nezbytné model dále zjednodušit.

⁷ Doba výpočtu na pracovní stanici vybavené 2x procesorem Intel Xeon 2.9 GHz a 12 GB RAM. Stejná stanice je uvažována pro odhady i ostatních časů nutných k výpočtu uvedených v této kapitole.



Obr. 48 - Model vozu SK258 - prvky s velikostí 150 mm.

Model s velikostí elementů 150 mm (viz Obr. 48) obsahuje 5 279 elementů. Karoserie byla dále výrazným způsobem zjednodušena a např. sloupky jsou tvořeny pouze 35 prvky. Tvar veškerých součástí je již pouze přibližný a prvky menší než 15 cm musely být zcela vypuštěny. Oproti předchozím modelům však simulace vyžaduje pouze 956 MB volné operační paměti a odhadovaná doba simulace pro jednu frekvenci je 7:54 min.

Tabulka 5 – srovnání nároků na výpočet pro modely s různou velikostí elementu sítě (pracovní stanice vybavena 2x procesorem Intel Xeon 2.9 GHz a 12 GB RAM)

Velikost elementu	Počet elementů	Potřebná RAM	Doba výpočtu
40 mm	36 331	45 316 MB	42:56 hod
80 mm	15 788	8 557 MB	3:31 hod
150 mm	5 279	956 MB	7:54 min

Z výše uvedených výpočetních nároků je jasné patrné, že model s velikostí prvku 150 mm bude nejvhodnější pro provádění prvotních simulací a výpočtů za účelem ověření správnosti zvoleného postupu. Pro přesné výsledky získané na základě zjednodušeného modelu pak můžeme s výhodou použít model s velikostí prvku 80 mm. Je ovšem nutno podotknout, že u modelů s takto velkými prvky sítě významně klesá horní kritická frekvence pro splnění podmínky ($< \lambda_{MAX} / 10$). V případě modelu s prvky o velikosti 150 mm je tato pouze 200 MHz a 375 MHz v případě modelu s prvky o velikosti 80 mm. Je proto nutno uvážit, za jakým účelem a do jaké mezní frekvence hodláme dané modely použít. V případě použití takto hrubého modelu je také nezbytné uvažovat o sub-meshingu pro lokální zjemnění sítě v oblasti analyzovaných prvků (pokud nepoužíváme model pouze pro výpočet rezonanční frekvence dutiny).

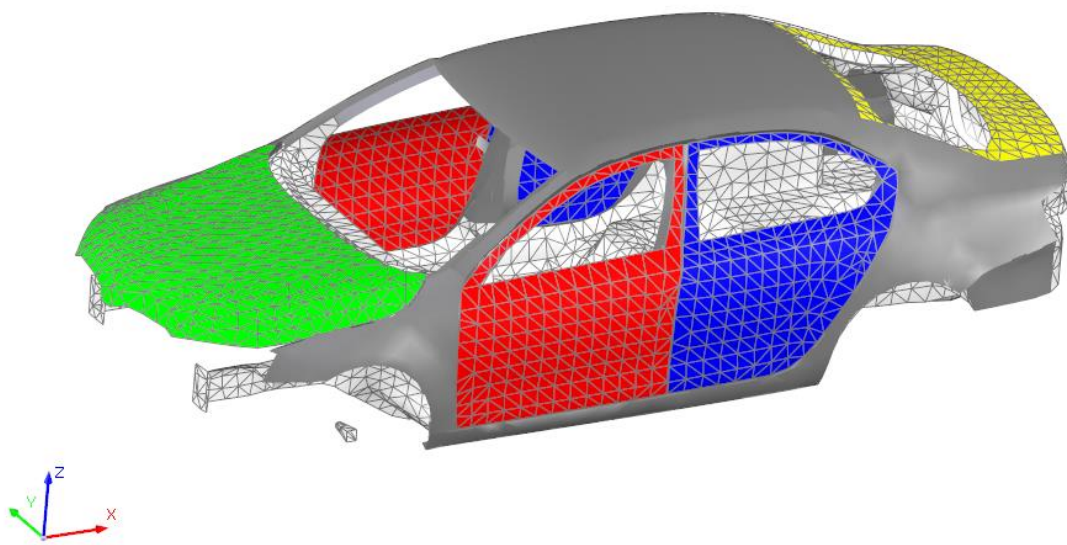
Kompletní model vozidla dle zásad uvedených v kapitole 2.3 rozdělíme na jednotlivé funkční celky. Tyto budou následně do simulace vkládány dle aktuální potřeby.

Získáme tak dostatečně modulární model, který můžeme přizpůsobit potřebám dané výpočetní úlohy.

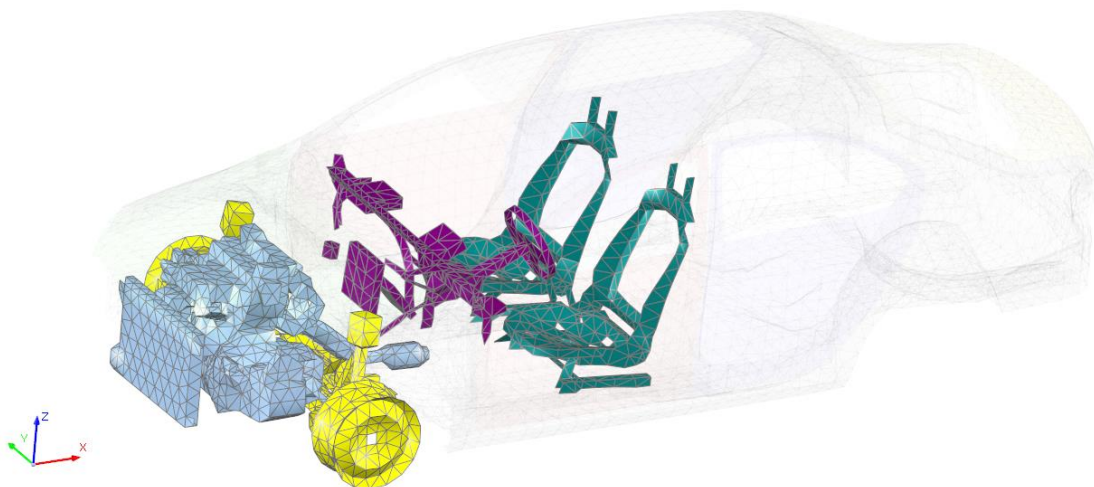
Principiálně je model rozdělen na dvě základní části:

- a) model okované a montované karoserie - tedy svařený skelet vozidla a montované dveře a víka (Obr. 49),
- b) další vkládané prvky mající zásadní vliv na změnu elektromagnetického prostředí vnitřní dutiny vozidla (Obr. 50). Jedná se o agregát, přední nápravu, výztuhu palubní desky a konstrukce sedadel.

V kapitole 2.4 bude předmětem zkoumání, jaký vliv mají jednotlivé doplňkové části modelu na rozložení povrchových proudů a pole uvnitř karoserie.



Obr. 49 – Základní model karoserie vozidla rozdělený podle funkčních celků majících zásadní vliv na změnu vnitřního elektromagnetického prostředí vnitřní dutiny.



Obr. 50 – Doplňkové části geometrie numerického modelu. Jedná se o agregát, přední nápravu, výztuhu palubní desky a konstrukce sedadel.

2.3.3. PROBLEMATIKA KABELOVÝCH SVAZKŮ

Kabelové svazky, jakožto integrální součást automobilu, představují velmi výrazný prvek, který by neměl být při komplexní simulaci vozidla opomenut. Představují totiž z hlediska EMC prvek, který má zásadní vliv jak při zkouškách odolnosti vozu vůči elektromagnetickým polím, tak i při zkouškách rušivého vyzařování, způsobeného funkcí automobilu a jeho vybavení. Ve vozidle totiž mohou představovat dle recipročního principu anténu, která se stává příjemcem vnějšího rušení (testovacího signálu), či anténu, která rušení z vozidla do okolí naopak vyzařuje. Oba tyto stavy jsou pro výrobce automobilů nechtěné a je nutno nasazovat kvůli nim rozsáhlá technická opatření.

Z pohledu automobilové EMC můžeme na problematiku kabelových svazků pohlížet z několika různých pohledů. Prvním z nich je analýza správné funkčnosti svazků při současném dodržení návrhových předpisů a restrikcí. Tyto poznatky, získané na základě zkušeností a numerických simulací u dřívějších projektů, jasně definují základní pravidla návrhu. Z množství různých opatření můžeme jmenovat:

- 1) pravidla pro trasování kabelových svazků,
- 2) definice maximální délky vodiče a minimálního průřezu vodiče,
- 3) pravidla pro povolení smyček na svazcích,
- 4) pravidla pro zemní koncept – maximální délka zemního vodiče ke kostře vozidla, rozmístění kostřicích bodů,
- 5) pravidla pro vzájemný souběh vodičů.

Všechna tato pravidla tvoří ucelený soubor požadavků, který při svém dodržení s vysokou mírou jistoty zajistí, že vozidlo a jeho součásti budou fungovat dle požadavků na ně kladených a z pohledu rušivého vyzařování nebudou představovat zásadní zdroj rušení. Z pohledu EMC je tato problematika relativně dobře prozkoumána a popisuje ji řada autorů. Problémům stochastických procesů na svazku, pravděpodobnosti výskytu vodiče ve svazku v definovaném místě a měřicích metodách spojujících oblast numerické simulace, stochastického svazku a reálného měření se věnuje [84] a [85]. Problematiku odhadu rušení vyzářeného kabelovým svazkem při měření dle známého standardu CISPR 25 a náhradu běžně používané anténní metody měření ve stíněné komoře (ALSE) pomocí měření CM proudové distribuce (common-mode) popisuje [86]. Pro účely kontroly návrhu kabelových svazků z pohledu EMC pak existují různé komerční nástroje, založené na různorodých platformách. Bez rozlišení tyto nástroje kombinují elektrická a mechanická CAD data do společného prostředí, což obvykle představuje nejhlubší problém EMC simulace. Obvykle je totiž pro návrh k dispozici alespoň částečný model karoserie vozidla a velmi dokonalý model kabelového svazku, který má být do této karoserie umístěn.

Tato situace se zdá pro analýzu z pohledu EMC ideální – jsou k dispozici téměř kompletní informace o řešené problematice. Problém ovšem nastává, stejně jako v případě výchozího modelu karoserie vozidla, ve zdánlivé dokonalosti tohoto popisu. Je nesmírně obtížný a komplexní úkol vybrat pro EMC analýzu patřičné dílčí části svazku a tyto do modelu implementovat. Není totiž v možnostech výpočetního HW ani SW provádět EMC simulaci s tak kompletním vozovým svazkem. Pro účely simulace tak musí být vybrány pouze zájmové vodiče a zbytek svazku je zanedbán. Klíčovou informací tak zůstává pozice daného vodiče vůči karoserii, jeho délka, proud protékající tímto vodičem a jeho zakončení.

Jako zástupce nástrojů, umožňujících relativně jednoduchou manipulaci se svazky, jejich zjednodušování, umístění do EMC simulace a zároveň kontrolu návrhových pravidel můžeme jmenovat [87] a [88].

Analýza vzájemné vazby vodiče a okolního prostředí představuje oproti předchozímu podstatně komplexnější otázku. Jejím cílem je identifikovat dva základní problémy: vodič jako oběť rušení, nebo vodič jako zdroj rušení. V prvním případě zkoumáme vazební cestu rušivého signálu obvykle z užitečného zařízení ve vozidle (typickým příkladem je palivové čerpadlo a rušení anténního svodu AM pásma) do daného vodiče a míru jeho projevu (obvykle odhad rušivého napětí a jeho průběh). V druhém případě je analyzován průchod rušivého proudu vodičem a jeho vliv na ostatní prvky vozidla - může se jednat o ostatní části kabelových svazků, nebo přímo antény vozidla (typickým příkladem je rušení vyzářené napájecím vodičem systému elektronického posilovače řízení způsobující špatnou diagnostickou funkci jednotky centrální elektroniky).

2.4. ANALÝZA ZJEDNODUŠENÍ SIMULAČNÍHO MODELU KAROSERIE

Počet prvků sítě významným způsobem ovlivňuje výpočetní náročnost řešení úlohy, ale zároveň i správnost a přesnost řešení. Snahou je co nejvíce zkrátit dobu nutnou pro provedení simulace, ovšem při zachování požadované přesnosti a spolehlivosti řešení. Tohoto požadavku můžeme dosáhnout nejjednodušeji zanedbáním určitých komponent vozu, které nebudou zahrnuty do výpočetního modelu. Vzhledem k tomu, že ale prvky vnitřního vybavení vozidla mohou významným způsobem měnit rozložení elektrického pole, musíme nalézt konsenzus mezi dobou výpočtu a správností výsledku.

Zanedbání vnitřních konstrukčních prvků vozidla může být také kritické z důvodu omezení, či úplného zanedbání cest proudů tekoucích mezi jednotlivými částmi jeho karoserie. Tento efekt může vést k nereálnému popisu rozložení proudů v karoserii a také k odlišné proudové hustotě v ostatních nezanedbaných oblastech. Z toho plyne pak odlišná rezonanční charakteristika karoserie a jejích prvků, včetně značného vlivu na velikost jednotlivých fenoménů. Je proto nezbytné důkladně analyzovat vliv zanedbaných komponentů, zvláště pak v situaci, kdy mohou být důležitou trasou povrchových proudů a zároveň se v jejich blízkosti nacházejí svazky elektrické instalace. Jako dobrý příklad může posloužit výztuha palubní desky, která tvoří paralelní vodivé spojení levé a pravé části vozidla a jsou podél ní trasovány hlavní kabelové svazky.

V následující kapitole je diskutován a experimentálně ověřen vliv zanedbání jednotlivých částí modelu karoserie vozidla na rozložení povrchových proudů a elektrického pole uvnitř karoserie vozidla. Numerické modely použité pro tento experiment představují vozy Škoda Rapid a Škoda Octavia 3. generace. Vlastní experiment se skládá z numerických simulací zkoumajících vlivy využití, resp. zanedbání níže uvedených komponent v modelu vozu.

Pro účely tohoto experimentu rozdělíme celou karoserii vozidla na následující části, dle principu uvedeného na obrázcích (Obr. 49 a Obr. 50). Pro všechny modely budeme uvažovat jako konstrukční materiál uhlíkatou ocel s vodivostí $\sigma = 0,6 \cdot 10^7 \text{ S/m}$.

Holá karoserie vozu

Karoserie vozu se skládá z jednotlivých svařovaných dílů. Na základě konstrukčních výpočtů jsou jednotlivé díly vyrobeny z oceli s různou tloušťkou materiálu. Pro účely simulace budeme uvažovat sílu materiálu 1 mm, což představuje průměrnou hodnotu v celém rozložení karoserie. V modelu jsou zanedbány veškeré plastové a skleněné díly, které jsou s karoserií přímo funkčně spojeny. Jedná se o kompletní nárazníky, díly vnějšího oplastování, podběhy, světlomety a skleněné výplně. Nejsou též uvažovány žádné prvky elektrického vybavení vozu včetně kabeláže. Montované prvky – dveře, kapota motorového prostoru a víko zavazadelníku - jsou umístěny se vzduchovou mezerou, ovšem vodivě připojeny ke zbytku karoserie pomocí prvků sítě modelu, simulujících panty.

Nosná konstrukce palubní desky

Nosná konstrukce palubní desky slouží jako hlavní výztuha této části vozu. Je na ni montována řada prvků elektrické výbavy vozu, včetně uchycení množství kabelových svazků. Tato konstrukce tvoří klíčový rezonanční prvek pro řídicí jednotky umístěné v palubní desce, šíří se jí množství povrchových proudů při expozici karoserie vůči elektromagnetickému poli a je zároveň důležitým elementem z hlediska zemního konceptu vozidla. Jedná se o patrně nejhůře numerickým modelem popsatelnou část vozidla – jednotlivé plechy, tvořící nosné prvky jednotlivých jednotek, jsou umístěny ve směru všech os vozidla a jejich existence přímo závisí na konfiguraci daného vozidla. V případě, že vůz určitou řídicí jednotkou nedisponuje, je tato část výztuhy jednoduše zanedbána. Pro účely této práce budeme proto uvažovat standardní vůz, vybavený nejčastěji zabudovávanými jednotkami.

Přední sedadla

Sedadla ve voze jsou běžně tvořena kovovou konstrukcí, systémem odpružení sedací plochy, polstrováním, systémem vyhřevu a vnějším potahem. Navíc existuje varianta s elektrickým ovládáním pozice sedáku, ve které je do sedadla zabudována čtveřice motorů a řídicí jednotka. Z hlediska numerické simulace budeme uvažovat existenci holé nosné kostry sedadla, která je vodivě připojena ke karoserii vozu. Sedadla budou uvažována s mechanickým ovládáním a bez vyhřevu. Systém vyhřevu sedadla ovšem představuje zajímavý problém z hlediska magnetických polí a jejich případného vlivu na posádku vozidla, zejména pokud je některá z osob nositelem kardiostimulátoru, nebo podobného senzitivního zařízení, majícího vliv na lidské zdraví [89].

Pohonná jednotka

Agregát vozidla a motorový prostor z hlediska množství kabelových svazků, senzorů a bezpečnostně relevantních řídicích jednotek představuje extrémně rozsáhlý analytický problém. Pro účely simulace je uvažován velmi zjednodušený model běžného agregátu – 1.6 TDI ve spojení s mechanickou převodovkou MQ250. Model tvoří pouze základní obrysy reálné jednotky, veškerá elektrická a elektronická výbava je vypuštěna. Agregát je stejně jako ostatní prvky vodivě připojen ke karoserii vozu. Vlastní simulace rozložení pole v motorovém prostoru je vzhledem k vysokému počtu řídicích jednotek, kabelových svazků a hadic provozních tekutin s diametrálně odlišnou vodivostí mimo možnosti dostupné výpočetní stanice.

Přední náprava vozidla

Simulaci je možno zaměřit i na vnější rezonanční dutiny vozu, zejména na podběhy a do nich umístěné nápravy. Zde mezi zájmové komponenty patří zejména snímače otáček kol, mající bezpečnostně - relevantní status z důvodu jejich propojení se systémem jízdní stabilizace vozidla. Z těchto důvodů byl připraven i model přední nápravy vozidla.

Do experimentu nebyly zařazeny další komponenty vozu, které nezasahují do zájmových oblastí zkoumání rozložení intenzity elektrického pole, nebo by jejich využití zcela neúměrně prodlužovalo výpočetní čas.

Konstrukce zadních sedadel

Prostor zadních sedaček není zájmovou oblastí. Nejsou zde umístěny žádné řídicí jednotky (s výjimkou dveřních jednotek, které se ovšem nacházejí ve stíněném montážním celku dveří). Konstrukce zadních sedadel je tvořena rámem, který kopíruje karoserii v místě jejich uchycení, předpokládáme tedy, že na simulaci oblasti předních sedadel nemá významný vliv.

Zadní náprava a zadní část výfukového potrubí včetně DPF filtru

I přes to, že zadní náprava společně s výfukovým potrubím tvoří významný kovový celek v zadní části vozu, nebudeme jej v simulaci využívat. Případné simulace odolnosti snímačů otáček provedeme na přední nápravě, která je více exponována jak rušivým signálům z motorového prostoru, tak signálům zkušebním při ozařování vozu z přední strany.

Veškeré plastové, skleněné a látkové dílce

Reálný vůz obsahuje velké množství plastových, látkových a skleněných dílů. Za účelem maximálního zjednodušení všechny tyto komponenty v simulaci rozložení intenzity elektrického pole v celém voze zanedbáme. V případě dílčích simulací samostatných dílů je ovšem nutné uvažovat následující součásti:

- 1) pokovení skel a jejich vybavení vyhříváním a anténami,
- 2) pokovení plastových dílů (ozdobné chromové lišty).

2.4.1. DEFINICE EXPERIMENTU

Z teoretických předpokladů uvedených v kapitole 2.2.2 usuzujeme, že umístění jednotlivých komponent do vnitřního prostoru karoserie významným způsobem změní rezonanční chování této dutiny. Předpokládáme posun vlastních rezonančních frekvencí dutiny směrem vzhůru a značné zvýšení lokální intenzity elektrického pole na hranách experimentálně vkládaných komponent. Pro dobrou vypovídací schopnost experimentu musíme uvažovat lokální zjemnění sítě modelu, zejména na hranách těchto dílů a v místech jejich napojení ke zbytku karoserie. Toto napojení je velmi důležitým aspektem – není možno jednotlivé díly do modelu karoserie pouze vložit, ale musíme zajistit i jejich vodivé propojení pomocí segmentů sítě.

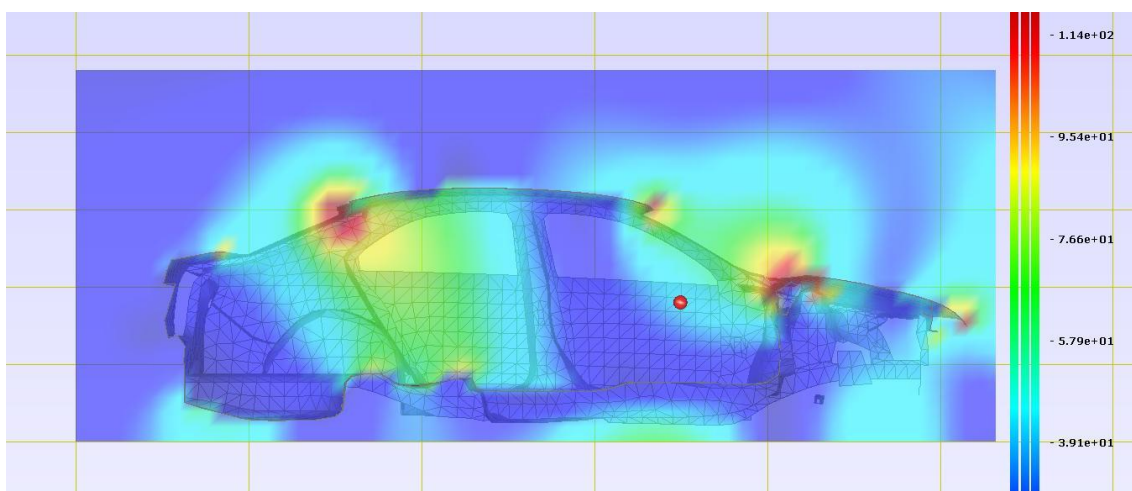
Vlastní experiment provedeme expozicí karoserie vozidla s postupně doplňovanými komponenty vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou s konstantní intenzitou elektrického pole $E = 30 \text{ V/m}$. Sledovaným parametrem je změna rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu karoserií vozidla, proudy tekoucí po karoserii a numerické hodnoty získané virtuálními sondami elektrického pole. Jako testovací frekvence byla pro vůz Rapid vybrána $f = 68 \text{ MHz}$ a pro vůz Octavia $f = 178 \text{ MHz}$.

2.4.2. ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

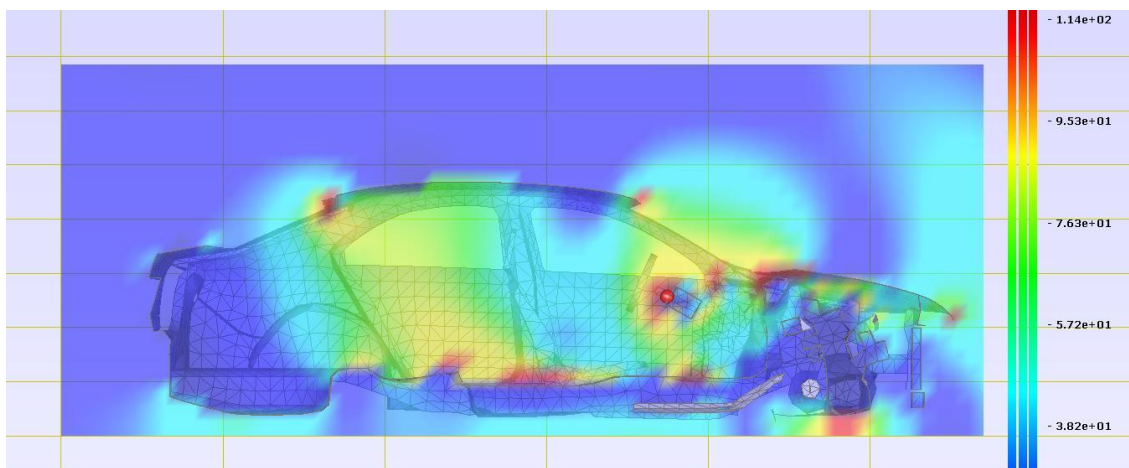
Řadou numerických simulací provedených pomocí EMC Studia (MoM) byly získány výsledky pro následující konfigurace:

- 1) holá karoserie,
- 2) karoserie + agregát,
- 3) karoserie + agregát + přední náprava,
- 4) karoserie + výztuha palubní desky,
- 5) karoserie + výztuha palubní desky + výztuha sedadel,
- 6) karoserie + agregát + přední náprava + výztuha palubní desky + výztuha sedadel.

V jednotlivých konfiguracích můžeme pozorovat při konstantním způsobu expozice modelu značné rozdíly v rozložení pole v karoserii. Rozdíly v rozložení intenzity elektrického pole v holé karoserii a plně vystrojeném modelu vozu Škoda Rapid ukazují obrázky (Obr. 51 a Obr. 52). Ostatní řezy pro výše zmíněné testovací konfigurace použité pro analýzu lze nalézt v Příloze 1.



Obr. 51 - Rozložení intenzity elektrického pole v holé karoserii vozu Škoda Rapid na frekvenci 68 MHz. Model je exponován z čela vertikálně polarizovaným polem o intenzitě $E = 30 \text{ V/m}$, intenzita el. pole v místě sondy $E_s = 41 \text{ V/m}$.



Obr. 52 – Rozložení intenzity elektrického pole v plně vystrojeném modelu vozu Škoda Rapid na frekvenci 68 MHz. Model je exponován z čela vertikálně polarizovaným polem o intenzitě $E = 30 \text{ V/m}$, intenzita el. pole v místě sondy $E_s = 151,5 \text{ V/m}$.

Na základě výsledků získaných během výše definované numerické analýzy jsme došli k následujícím zjištěním:

- 1) Vnitřní prostor karoserie se v každé konfiguraci chová jako dutinový rezonátor s proměnnými přirozenými rezonančními módy. Míra jejich změny závisí na umístění vnitřní výbavy vozidla. Tyto vložené části (výztuha palubní desky a konstrukce sedadel) fungují jako „clony“ měnící elektrické rozměry vnitřní dutiny a posouvají tak rezonanční kmitočty frekvenčně výše.
- 2) Na základě teoretických předpokladů jsme očekávali vyšší proudovou hustotu na ostrých hranách modelu (zejména v místech vazebních otvorů do vnitřního prostředí karoserie) a také v místech připojení dílčích částí modelu ke karoserii vozidla. Tyto předpoklady byly numerickou simulací potvrzeny. K lokálnímu zvýšení proudové hustoty došlo zejména na horní hraně střechy vozidla a také na rámech oken ve dveřích. Byla zjištěna rovněž vysoká proudová hustota v místech „virtuálních pantů“ zejména předních dveří a kapoty, kudy při frekvencích blízkých rezonanci protékají proudy z daného objemového prvku do zbytku karoserie vozidla. V případě, že bychom modelovali tato spojení jinak, než je tomu v reálném stavu, získali bychom zcela odlišnou proudovou mapu, včetně odlišného rezonančního chování karoserie.
- 3) Proudové tekoucí po modulově vkládaných komponentech mají relativně malý vliv na celkové rozložení proudů v karoserii. Žádný z nich nepředstavuje zásadní paralelní či jedinou vodivou cestu, po které by se proudy šířily při zanedbání jiné části vozidla. Klíčový je zejména vliv na posun rezonančních kmitočtů. Jiná situace nastává ale při popisu rozložení proudu přímo na těchto modulových komponentech. Bylo zjištěno, že zejména po výztuze palubní desky a bloku motoru se šíří v rezonanci proudy, které mohou ovlivnit kabelové svazky na nich umístěné.
- 4) Abychom dosáhli realistického popisu vnitřního prostředí karoserie, je nezbytné, aby byly v celkovém modelu pro předcertifikační simulaci použity konstrukce sedadel a výztuha palubní desky. Bez těchto elementů nemůžeme dosáhnout věrného popisu rozložení pole v těchto místech. Pro značnou hrubost modelu a nízkou vypovídací schopnost takové simulace navrhuje v předcertifikační simulaci zanedbat kompletně výbavu motorového prostoru

(jak agregát, tak přední nápravu). Tyto prvky jsou od prostoru cestujících odděleny příčnou stěnou a případné ovlivnění této samostatné rezonanční dutiny je na uvažovaném frekvenčním rozsahu (s přihlédnutím k velikosti vazebních otvorů mezi motorovým prostorem a prostorem pro posádku) nepravděpodobné. Případné rušení, zavlečené do prostoru pro posádku po vodičích, lze jednoduše simulovat jinými metodami.

2.4.3. SHRnutí

Na základě analýzy získaných poznatků definujeme závěry platné pro předcertifikační simulaci:

- 1) V oblasti nízkých kmitočtů, tedy v situaci, kdy má dopadající elektromagnetické pole podstatně větší vlnovou délku, než jsou fyzické rozměry dutiny, je vnitřní prostředí této dutiny definováno zejména největšími vazebními otvory. Další významný prvek, který vnitřní prostředí významně ovlivňuje, jsou povrchové proudy tekoucí po povrchu karoserie a jsou ovlivňovány buď přímo vodivou vazbou, nebo pomocí difuze.
- 2) V oblasti kmitočtů s vlnovými délkami srovnatelnými s vnitřními rozměry dutiny je vnitřní elektromagnetické prostředí dominantně určeno charakteristickými (přirozenými) módy této dutiny. Jedná se o frekvenčně klíčovou oblast, neboť právě v tomto rozsahu budicích kmitočtů může intenzita elektrického pole několikanásobně překročit intenzitu pole budicího.
- 3) V oblasti vysokých kmitočtů, kdy je vlnová délka budicího pole mnohonásobně nižší, než jsou rozměry vlastní dutiny karoserie, můžeme její vnitřní prostředí považovat při přijatelné míře nejistoty za homogenní. Musíme přitom uvažovat vnitřní vybavení umístěné v dutině karoserie – např. výztuhu palubní desky, volant, či výztuhy sedadel, pro které je oblast vysokých kmitočtů vzhledem k jejich fyzickým rozměrům od celé dutiny značně odlišná.

2.5. VLIV POZICE ZDROJE TESTOVACÍHO POLE NA VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE

Pozice zdroje testovacího pole hraje z hlediska vzniku rezonančních fenoménů ve vnitřním prostředí vozidla významnou roli. Tento předpoklad jasně potvrzují prvotní výsledky získané na testovacím modelu (kapitola 2.2.3), kdy orientace modelu z čela nebo z boku zcela měnila poměry ve vnitřní dutině modelu a rozdíly měřených intenzit pole činily až 90 %. Proto považujeme za nezbytné provést analýzu tohoto vlivu na modelu celého vozidla a vyvodit tak závěry pro vhodnost směru expozice zde navrhovaných předcertifikačních metod.

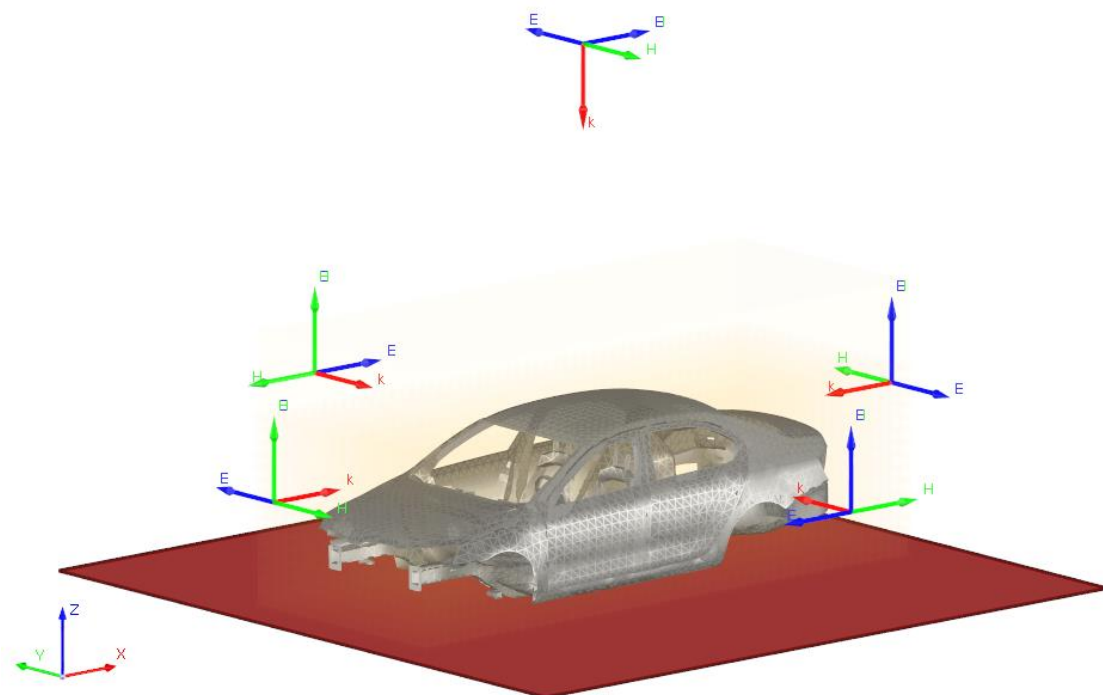
2.5.1. DEFINICE EXPERIMENTU

Cílem tohoto experimentu je porozumění závislosti rozložení elektrické složky intenzity pole ve vnitřním prostředí karoserie na umístění zdroje testovacího pole. Při reálných zkouškách odolnosti vozidel jsou vzhledem ke konstrukčním řešením zkušebních pracovišť nejčastěji k dispozici směry šíření kolmé na osu z numerického modelu, méně obvykle pak kolmé na osu x . V tomto smyslu definujeme 5 základních směrů (Obr. 53), ze kterých budeme vůči modelu karoserie vysílat zkušební pole za účelem identifikace pozice zdroje, majícího nejsilnější vazbu na vnitřní prostředí karoserie. Jedná se o následující směry:

- 1) z čela (front),
- 2) zleva (left, driver-side),
- 3) zezadu (back),
- 4) zprava (right, co-driver side),
- 5) shora (top).

Vzhledem k tvaru zkoušeného vozidla a dominantním přirozeným vidům jeho vnitřní dutiny předpokládáme nejvyšší vazbu vnějšího pole do vnitřního prostředí v pozici z čela (zejména při vertikální polarizaci) a z boku (není nutno rozlišovat, jedná-li se o pravou, nebo levou stranu) při horizontální polarizaci.

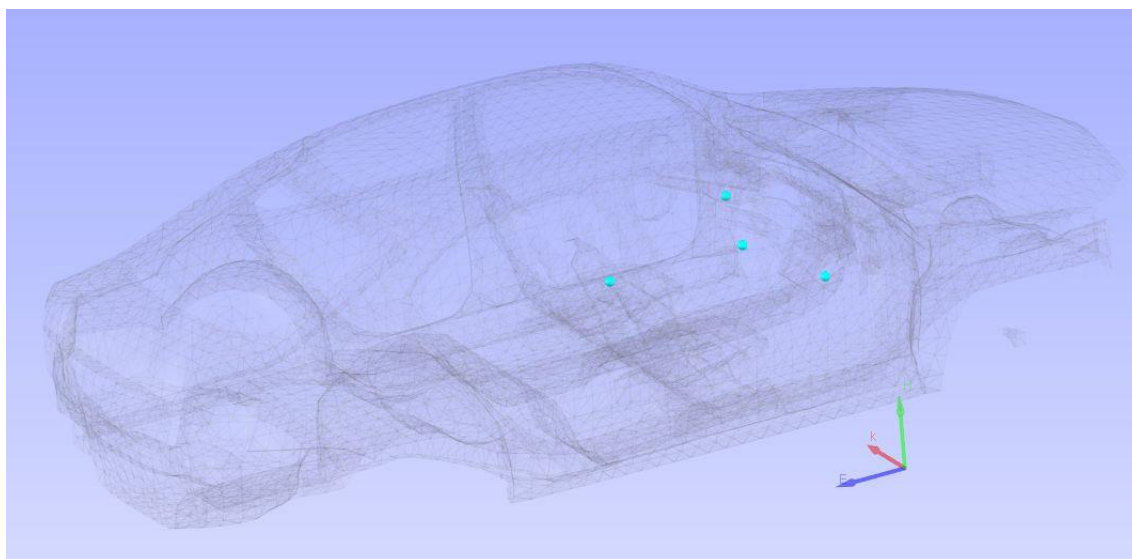
Pro popis šíření budeme uvažovat pouze vertikálně a horizontálně polarizovanou rovinnou vlnu. Rovinná vlna je uvažována jako frekvenčně konstantní, jejíž čela vln jsou nekonečné paralelní vlnoplochy s konstantní amplitudou kolmou k vektoru fázové rychlosti. V praxi není možné získat skutečnou rovinnou vlnu. V praxi lze ovšem dosáhnout vln, které jsou přibližně rovinnými vlnami v určitém omezeném prostoru. Například lokalizovaný zdroj vytváří takové pole, které je podobné rovinné vlně, ovšem jen ve vzdáleném poli a v úzce omezené oblasti pozorování.



Obr. 53 – Schematické znázornění umístění zdrojů testovacího pole. Červeně označena zemní rovina.

2.5.2. ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

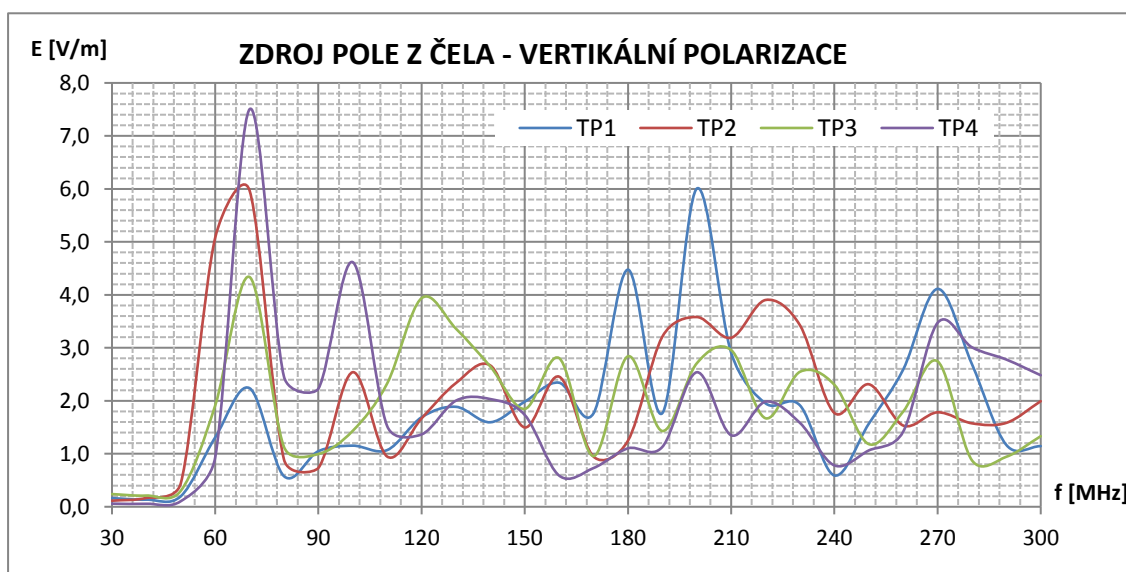
Ověření teoretických předpokladů jsme provedli sérií numerických simulací v dané konfiguraci. Rovinná vlna s intenzitou pole $E = 1 \text{ V/m}$, jakožto zdroj testovacího pole, byla vždy umístěna v příslušné pozici dle kapitoly 2.5.1. Pro měření intenzity elektrického pole jsme v karoserii stanovili čtyři základní měřicí body (TP1 – TP4) rozmístěné tak, aby dobře refletovaly jednak směr šíření přicházející vlny, ale taktéž i klíčová místa z hlediska rozmístění senzitivních řídicích jednotek vozidla. Jejich pozici ilustruje obrázek (Obr. 54).



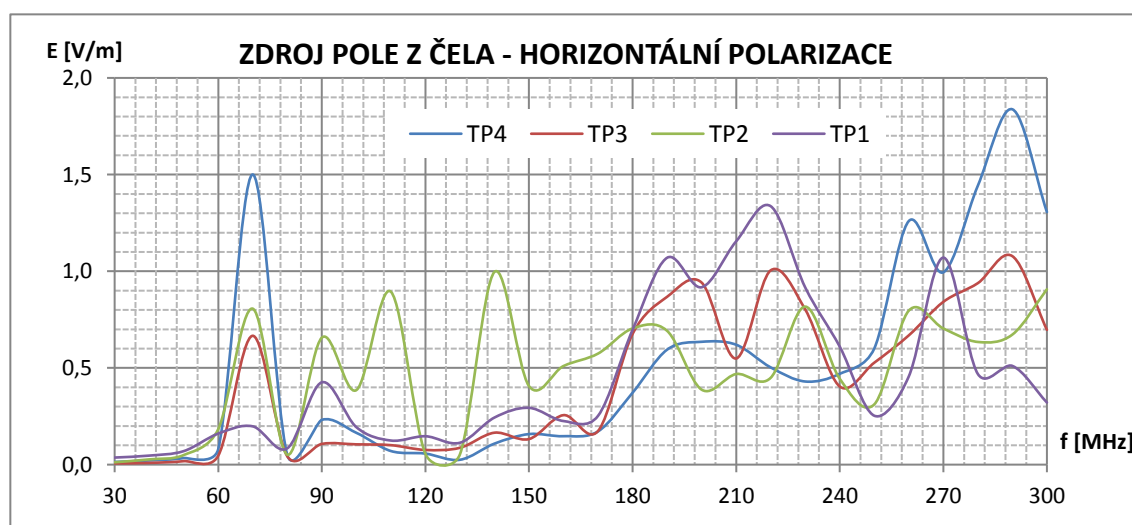
Obr. 54 – Umístění měřicích bodů uvnitř karoserie vozidla zdrojů testovacího pole. V blízkosti volantu na levé straně bod TP4 (6697), na střední konzole bodu TP3 (6954), v prostoru mezi sedadly bod TP2 (6960) a vpravo bod TP1 (7208).

Rozmístění těchto měřicích bodů také přibližně reflektuje umístění bodů při předcertifikačním a certifikačním měření. Předpokládáme, že se projeví vliv polarizace přicházející vlny na vybuzení příslušných módů a výsledky získané pro určitý testovaný směr se pro různé polarizace budou významně lišit. Rovněž se domníváme, že se významně uplatní stínící vlastnosti jednotlivých částí karoserie. Očekáváme naopak, že v případě zkoušky zleva a zprava budou výsledky téměř totožné. Otázkou zůstává pouze příspěvek volantu a jeho uchycení, neboť tento prvek představuje jedinou nesymetrii, která by mohla způsobit odlišné rozložení pole v karoserii.

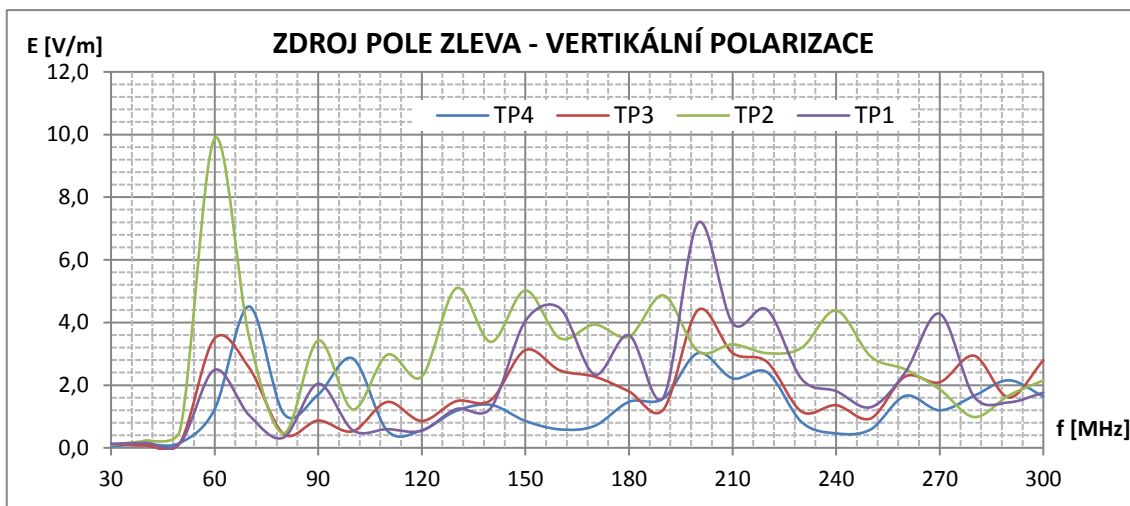
Protože se jedná pouze o orientační simulaci, mající za úkol stanovit pozici, ze které dojde k nejvyššímu vybuzení vnitřního prostoru, provedeme ji v uvažovaném rozsahu 30 – 300 MHz s krokem 10 MHz. Je zřejmé, že takto široký frekvenční krok nemůže postihnout veškeré frekvenčně závislé fenomény, ale považujeme jej za dostatečný z hlediska prvotní identifikace a kvantifikace těchto jevů.



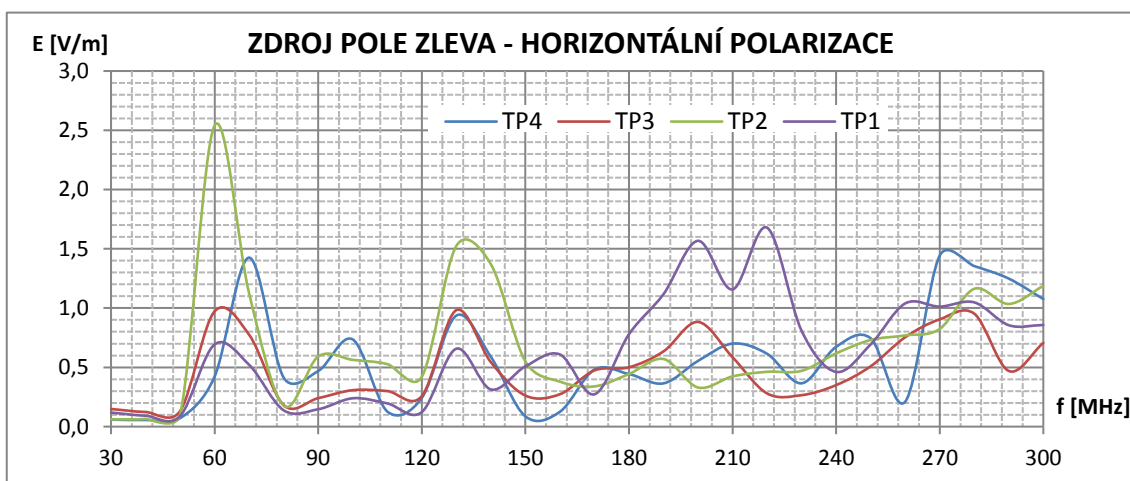
Obr. 55 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici z čela, ver. polarizace.



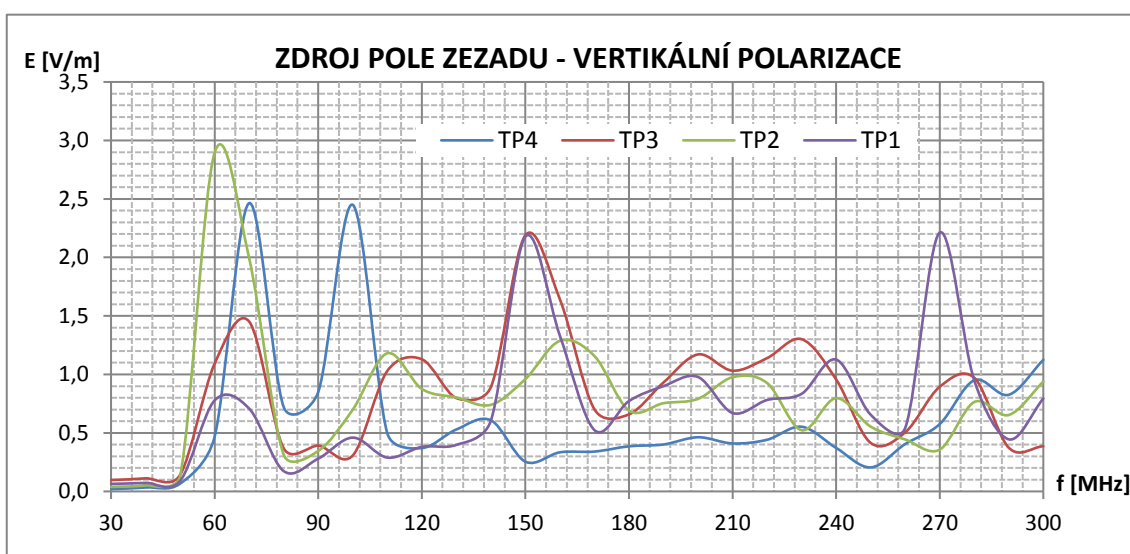
Obr. 56 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici z čela, hor. polarizace.



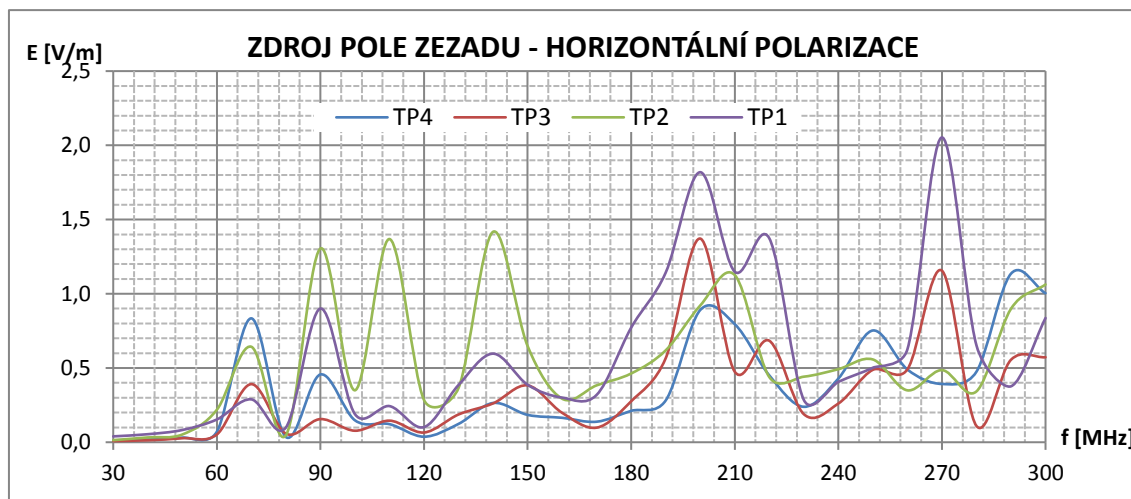
Obr. 57 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zleva, ver. polarizace.



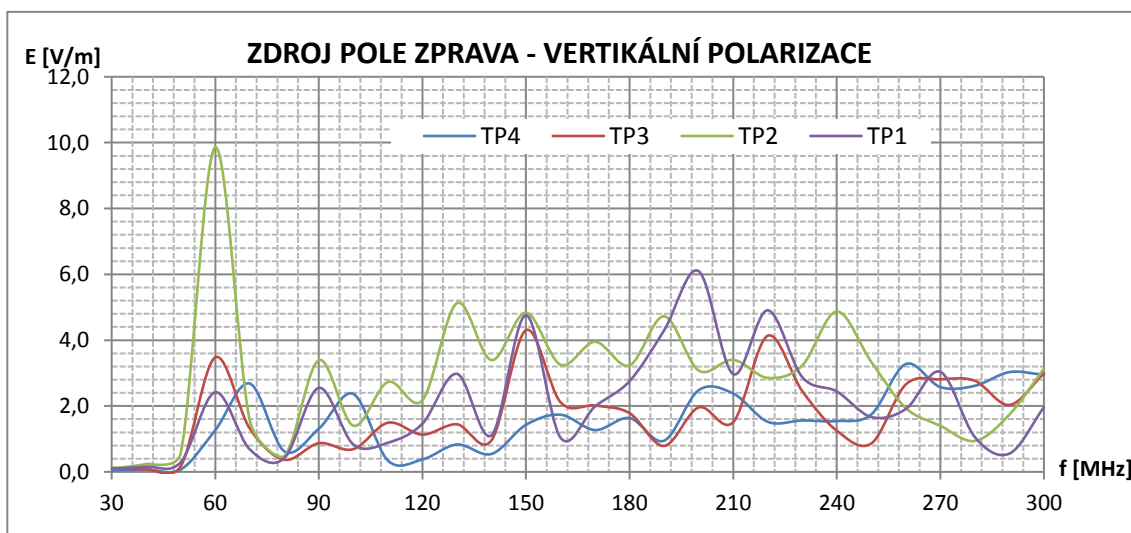
Obr. 58 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zleva, hor. polarizace.



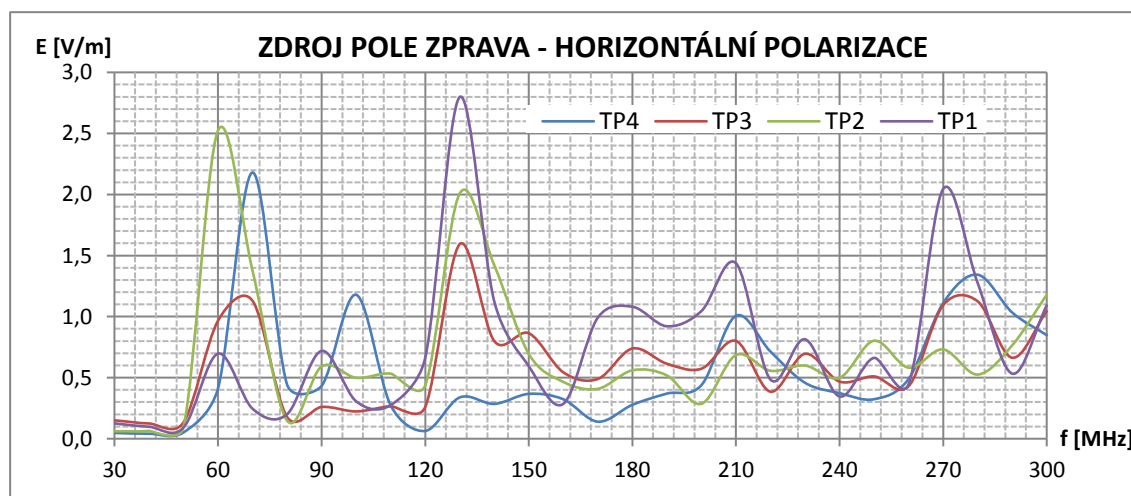
Obr. 59 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zezadu, ver. polarizace.



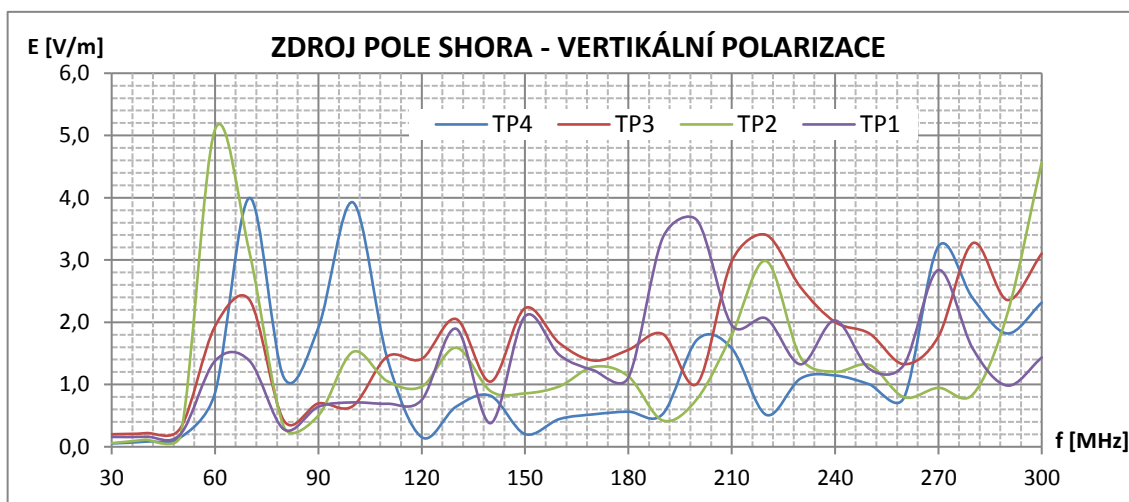
Obr. 60 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zezadu, hor. polarizace.



Obr. 61 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zprava, ver. polarizace.



Obr. 62 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zprava, hor. polarizace.



Obr. 63 - Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici shora, ver. polarizace.

Při expozici modelu vozidla z čela byla naměřena maximální intenzita elektrického pole $E = 7,5 \text{ V/m}$ v případě vertikální polarizace (Obr. 55) a pouze $E = 1,84 \text{ V/m}$ v případě horizontální polarizace (Obr. 56). Toto zjištění plně odpovídá teoretickým předpokladům, neboť v případě vertikální polarizace kmitá vektor intenzity elektrického pole \vec{E} přicházející rovinné vlny ve směru osy Z, tedy uvnitř karoserie vozu mezi střechou a podlahou vozidla. Z výsledků je rovněž patrné, že dochází k nárůstu povrchových proudů na sloupku řízení a lokálnímu zvýšení intenzity elektrického pole v bodech TP4 a TP3. Naopak v případě bodu TP1 se uplatňují stínící účinky mezistěny motorového prostoru, která způsobí, že intenzita měřená v tomto bodě dosahuje maximálně $E = 2,1 \text{ V/m}$. Bod TP2 pak postihuje nejlépe rezonanční chování dutiny vnitřního prostoru karoserie. Maximální hodnota intenzity elektrického pole $E = 5,97 \text{ V/m}$ je v tomto bodě na frekvenci 70 MHz, což v zásadě odpovídá závěrům získaným u testovacího modelu vozidla. Tam byla zjištěná první rezonanční frekvence na kmitočtu 88 MHz, což je přijatelná míra odchylky, zvláště s přihlédnutím na hrubý frekvenční krok tohoto experimentu. V případě horizontální polarizace se významně projevuje nízká jakost rezonanční dutiny, a proto pozorujeme pouze velmi nízké intenzity pole v karoserii ve všech měřených bodech. Nejvýrazněji se opět projevuje nárůst povrchových proudů na sestavě volantu, kdy na již známém kmitočtu 70 MHz dochází ke skokovému nárůstu intenzity elektrického pole na $1,5 \text{ V/m}$.

Při expozici modelu vozidla ze stran – tedy zleva i zprava - jsme očekávali velmi podobné hodnoty měřených intenzit pole s neurčitým vlivem sloupku řízení. V případě vertikální polarizace elektromagnetické vlny zleva (Obr. 57) a zprava (Obr. 61) se hodnoty intenzity elektrického pole skutečně téměř neliší. Nejvýraznějším rezonančním fenoménem je frekvence 60 MHz s $E = 9,88 \text{ V/m}$, měřená v bodu TP2, tedy mezi sedadly. Dle teoretických předpokladů jsme v tomto místě na dané frekvenci žádný podobný fenomén neočekávali. Jeho původcem jsou pravděpodobně výztuhy sedadel, což potvrzuje i skutečnost, že na ostatních měřicích bodech nebyl tento jev zaznamenán. Můžeme si všimnout zřejmé rezonance vnitřního prostoru, ke které došlo na kmitočtu 150 MHz a je zaznamenána všemi měřicími body. Tato frekvence koresponduje s teoretickými předpoklady, ale i prvotní simulací na testovacím modelu. Na výsledcích nepozorujeme nijak výrazný stínící efekt bočních stěn karoserie. Očekávali jsme, že body přilehlé ke stěně, z jejíhož směru přichází vlna, budou alespoň určitým způsobem

zastíněny a intenzita elektrického pole v těchto bodech měřená bude nižší. Tento předpoklad se ale neprokázal, neboť bod TP4 v případě expozice zleva, respektive bod TP1 v případě expozice zprava, nebyl vystaven výrazně nižší intenzitě elektrického pole než body ostatní. Tento jev vysvětlujeme tak, že vazební dutina vnitřního prostoru (okno) je při dané vlnové délce již natolik velká, že stínící efekt za překážkou se uplatňuje pouze v jejím blízkém okolí, do kterého měřicí body TP1 a TP4 nespádají.

Zatímco výsledky získané pro vertikální polarizaci se téměř neliší, hodnoty měřené pro horizontální polarizaci zleva (Obr. 58) a zprava (Obr. 62) se liší výrazně. Při expozici zleva pozorujeme frekvenčně podobné jevy jako v případě vertikální polarizace s dominantní rezonanční frekvencí 60 MHz s $E = 2,54$ V/m v bodě TP2 (rezonance na frekvenci 150 MHz je potlačena), při expozici zprava se však vnitřní prostředí chová odlišně. Kromě již popsané rezonance na frekvenci 60 MHz se zde přidává navíc velmi dominantní kmitočet 130 MHz s $E = 2,8$ V/m v bodě TP1 (v bodech TP2 i TP3 je tento jev zaznamenán rovněž), přičemž v bodě TP4 je uvedená rezonanční frekvence téměř úplně potlačena. Jedná se o vliv nesymetrie vnitřního prostoru, způsobený zejména sloupkem řízení a volantem. Zatímco v případě vniku vlny do vnitřního prostoru zprava této vlně po průchodu vazební dutinou nic nebrání a vznikne na uvedených kmitočtech rezonance, v případě vniku zleva vlna dále dopadá na sloupek řízení a teprve poté se šíří do vnitřního prostoru. Díky tomu dojde k výraznému nárůstu intenzity elektrického pole na této součásti vozu, ve vnitřním prostředí karoserie je ale paradoxně díky tomu rezonance na známých frekvencích potlačena.

V případě expozice modelu zezadu vertikálně polarizovanou elektromagnetickou vlnou (Obr. 59) je průběh intenzity elektrického pole frekvenčně podobný expozici z čela (opět ver. polarizace). Dominantní zůstává kmitočet 60 MHz s $E = 2,90$ V/m (v bodě TP2). Odlišně od expozice z čela se však objevují rezonance na 150 MHz a 270 MHz.

Pokud ale model vystavíme horizontálně polarizované vlně (Obr. 60), rozložení pole ve vnitřním prostoru se výrazně změní. Je potlačena výrazná rezonance na kmitočtu 60 MHz a posouvá se na trojici kmitočtů (dominantních pouze v bodě TP2) 90, 110 a 140 MHz s $E = 1,3$ V/m. Hlavní rezonanční frekvence je pak pozorována až na 200 MHz s $E = 1,82$ V/m v případě všech bodů a již jmenovaných 270 MHz v případě bodu TP1. Toto výrazně odlišné chování stejné dutiny vyplývá z velmi odlišného vazebního otvoru. Zatímco v případě čelního okna je otvor do rezonanční dutiny dodatečně velký pro vnik vlny umožňující vznik rezonance na nízkých kmitočtech, v případě podstatně menšího zadního okna vnikající vlny způsobují až vyšší rezonanční kmitočty.

Při expozici modelu shora (Obr. 63) bylo pozorováno chování vnitřní dutiny téměř shodné s předešlými konfiguracemi. Dominantním rezonančním kmitočtem je opět 60 MHz s intenzitou elektrického pole $E = 5,1$ V/m v bodě TP2. Navíc ale byly v bodě TP4 (sloupek řízení) pozorovány dva lokalizované hot-spots na frekvencích 70 a 100 MHz, které se při žádné jiné konfiguraci neobjevily. Jedná se patrně o důsledek dopadu vlny shora, která díky tvaru vazebního otvoru předního okna dopadá přímo na sloupek řízení a způsobuje uvedené rezonanční jevy.⁸

⁸ Z praktických důvodů uvažujeme pouze vertikální polarizaci, neboť zkouška v reálném prostředí je realizována pomocí páskového vedení – stripline, které v běžné konfiguraci neumožňuje realizovat test horizontálně polarizovanou vlnou.

2.5.3. SHRnutí POZNATKŮ

V této kapitole jsme důkladně prozkoumali a diskutovali vliv umístění zdroje testovacího pole na rozložení elektrického pole uvnitř karoserie zkoumaného vozu. Na základě analýzy vazby vnějšího a vnitřního prostředí – různé tvary a velikosti vazebních otvorů (oken vozidla), dominantních rezonančních módů a nesymetrií vnitřní výbavy vozidla můžeme učinit následující doporučení.

- 1) Nejvyšších intenzit elektrického pole bylo dosaženo v případě expozice vozidla z čela vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou. Díky dominantním módům, které se v této konfiguraci a uvažovaném frekvenčním rozsahu uplatňují, nezáleží na množství vazebních otvorů v bocích karoserie (boční okna). Vnik vlny do vozidla rovněž podporuje dostatečně velký vazební otvor tvořený čelním oknem, který díky svým rozměrům umožní vznik i nejnižších teoreticky možných nejsilnějších rezonančních módů TE_{101} . Rovněž se výrazně uplatňuje nárůst intenzity elektrického pole ve všech klíčových měřených bodech, nejvýrazněji na sloupku řízení a v místě čelního panelu systému infotainmentu. Expozice těchto míst při zkoušce je zvláště důležitá, neboť touto oblastí prochází řada životně důležitých vozových sběrnic, které mohou být expozicí polem rušeny. Na základě výše uvedených zjištění tuto pozici při zkoušce zařazujeme do doporučené předcertifikační metodiky.
- 2) Jako druhou zkušební pozici navrhuje zkoušku zprava, při horizontální polarizaci. Expozice vozidla z bočního směru dává vzniknout odlišným rezonančním módům dutiny a tím exponuje odlišné části vozidla než při zkoušce z čela. Na základě jednoduššího vniku vlny do vozidla z pravé strany (kde vlna nedopadá ihned po průchodu vazebním otvorem na sloupek řízení) může dojít ke vzniku vyšších úrovní pole v rezonanci a tím důkladnější zkoušce vozidla – proto vybíráme právě tuto pozici.
- 3) Velmi zajímavou alternativou ke všem testovacím pozicím kolmým na osu z vozidla se ukazuje zkouška vozidla vertikálně polarizovanou vlnou shora. Bylo ukázáno, že až do frekvence 100 MHz je expozice bodů TP4, TP3 a TP1 (tedy bodů nacházejících se na okraji vnitřní dutiny vozidla) téměř totožná se zkouškou z čela při vertikální polarizaci. Tento jev je pozorován z důvodu velkého vazebního otvoru (čelního okna), kdy vlna dopadá přímo na místo pozorování. Problém ovšem nastává, pokud zájmová oblast leží hlouběji ve vozidle a je tak přímo stíněna střechou vozidla (samozřejmě pokud se nejedná o vozidlo s prosklenou střechou), kdy je vnik vlnění do tohoto prostoru a zejména na vyšších frekvencích velmi omezen. Můžeme proto tuto pozici doporučit pro zkoušky do 100 MHz, pokud to konstrukční řešení umožní.

2.6. PŘEDCERTIFIKAČNÍ SIMULACE CELÉHO VOZU

2.6.1. DOPORUČENÍ PRO PŘEDCERTIFIKAČNÍ SIMULACI

Předcertifikační simulaci celého vozu provedeme na základě poznatků a doporučení prezentovaných v kapitolách 2.1 až 2.5. Zde uvádíme souhrn nejdůležitějších zásad.

- 1) Při přípravě modelu pro účely EMC simulace vyjdeme z podrobných modelů využívaných v oblasti crash modelování. Ještě před převodem do vlastního nástroje pro tvorbu modelu zajistíme zjednodušení výchozích dat. Zanedbáme veškeré zbytečné konstrukční části vozidla (detaily úchytek, lemů, osazení) při zachování základní geometrie vozidla. Rovněž eliminujeme veškeré komponenty nepodstatné z hlediska elektrodynamického popisu – plastové, látkové a gumové díly, skleněné výplně a pěny.
- 2) Převedený model dle zásad uvedených v kapitole 2.3 dále zjednodušíme. Zaslepíme veškeré malé otvory a zanedbáme části menší, než je cílová velikost buňky výpočetní sítě ($< \lambda_{MAX} / 10$). Rovněž eliminujeme části zcela obklopené jinými povrchy (například výztuhy dveří, zcela obklopené jinými vodivými součástmi karoserie).
- 3) V modelu se zaměříme na části klíčové z elektrodynamického pohledu – okovanou a montovanou karoserii vozidla a zájmové prvky vnitřního vybavení. Na základě poznatků z kapitoly 2.4 pro tvorbu modelu použijeme kompletní kovovou karoserii vozidla, výztuhu palubní desky včetně volantu a konstrukci sedadel. Model v tomto duchu modulárně rozdělíme, aby bylo možno jednotlivé jeho části v případě potřeby do simulace vkládat a naopak.
- 4) Zvolíme typ simulační úlohy dle řešené problematiky a frekvenčního rozsahu, jak je uvedeno v kapitole 1.3.1. V našem případě uvažujeme simulaci ve frekvenční oblasti, použité metodě přizpůsobíme i tvorbu simulačního modelu.
- 5) Vytvoříme trojúhelníkovou síť (mesh) popisující povrch modelu. Maximální délka hrany či prvku je dána podmínkou ($< \lambda_{MAX} / 10$), přičemž ideální tvar buňky diskretizační sítě je rovnostranný trojúhelník. V technické praxi je tato podmínka obtížně splnitelná. Uvažujeme proto hraniční poměr 1/5, který vyjadřuje, že nejkratší hrana trojúhelníku může být maximálně 1/5 hrany nejdelší. Při porušení těchto podmínek již není zaručena očekávaná přesnost výpočetní metody. Pokud není možno při modelování určitých prvků tohoto poměru dosáhnout, je nezbytné volit menší velikost diskretizační buňky. V kapitole 2.3 jsme stanovili pro účely této práce maximální délku hrany či prvku na 8 cm, což činí model použitelným do 375 MHz.
- 6) Zajistíme technicky dobrou kvalitu modelu – musíme odstranit veškeré překrývající se, volné a nenavazující segmenty. Volíme vhodný postup kontroly diskutovaný v kapitole 2.3, s výhodou můžeme využít externích nástrojů (v případě této práce nástroj ReMesh). Dbáme na propojení jednotlivých prvků karoserie pomocí přidaných prvků geometrie modelu. Musíme tak zajistit spojení mezi jednotlivými integrálními částmi okované karoserie, ale i mezi díly běžně spojenými panty (dveře, víka). Provedeme lokální zjemnění sítě (sub-meshing) na hranách modelu, v místech napojení ostatních částí a také pod uvažovanými trasami kabelových svazků.

- 7) V simulačním prostředí definujeme materiálové parametry karoserie (PEC, nebo reálný ztrátový materiál), zvolíme parametry zemní roviny (ideální zemní rovina, reálná zemní rovina suchá, reálná zemní rovina vlhká).
- 8) Na základě poznatků z kapitoly 2.5 zvolíme vhodný zdroj zkušebního elektromagnetického pole a jeho pozici vůči modelu. Doporučujeme použít vertikálně a horizontálně polarizovanou rovinnou vlnu, v pozici z čela modelu. Rovněž doporučujeme simulace i z boku modelu (se stejnými parametry) pomocí horizontální polarizace z důvodu vybuzení jiných vlastních rezonančních módů dutiny karoserie. Záleží ovšem na možnostech validace této simulace pomocí měření. Při realizaci této disertační práce není k dispozici stíněné pracoviště umožňující expozici vozidla z boku, a proto nebudeme expozici z boku provádět.
- 9) Intenzitu zkušebního pole E můžeme zvolit dvěma možnými způsoby. Prvním způsobem je konstantní intenzita v celém zkušebním rozsahu, vycházející z navazujících testů, pomocí kterých budeme výsledky numerické simulace verifikovat (v našem případě 30 V/m dle certifikační úrovně). Druhou možností je pak proměnná intenzita zkušebního pole v závislosti na maximální dosažené testovací intenzitě při předcertifikační zkoušce (testovací sestava nedokáže generovat konstantní intenzitu elektrického pole v celém frekvenčním rozsahu). Druhým zmíněným způsobem dosáhneme podstatně vyšší míry shody mezi numerickou simulací a výsledky předcertifikačního měření.
- 10) Nastavíme způsoby sledování a měření výsledků simulace. Doporučujeme sledovat model pomocí řezů rozložení intenzity elektrického pole (přehled nad distribucí intenzity elektrického pole v prostoru), matice virtuálních sond elektrického pole (numerická kvantifikace frekvenční závislosti intenzity pole), mapy proudového rozložení na karoserii (identifikace povrchových proudů v rizikových oblastech modelu) a virtuálních sond napětí a proudu na kabelovém svazku (popis průběhu rušivého signálu na svazku). V případě aplikace takto komplexního způsobu sledování je nutno počítat s prodloužením celkové doby výpočtu. Tento postup ovšem uspoří celkový čas nutný pro komplexní realizaci simulace, neboť znalost jednotlivých veličin je pro určení správnosti simulace klíčová a jejich postupné dílčí výpočty by v součtu dobu strávenou výpočtem významně prodloužily.
- 11) Nastavíme vhodný frekvenční rozsah simulace. Vždy dbáme na maximální horní frekvenci, pro kterou je používáný numerický model ještě použitelný (podmínka $(< \lambda_{MAX} / 10)$). Při této úvaze se zaměřujeme také na komponenty, které v daném frekvenčním rozsahu mají z elektrodynamického hlediska význam (kapitola 2.4). Frekvenční rozsah simulace nastavujeme vždy s přihlédnutím ke zkoumané problematice (dle zásad z kapitoly 2.4.3) s takovým krokem, aby mohl postihnout typické fenomény vyskytující se v dané frekvenční doméně. V případě této práce budeme používat rozsah 30 – 220 MHz s uvažovaným krokem 1 MHz shodný s pásmem b předcertifikačního i certifikačního měření daný koncernovou normou TL 81000.
- 12) Provedeme zkušební simulaci dle výše uvedených zásad pro jednu vybranou testovací frekvenci. Obvykle volíme kmitočet blízky teoreticky očekávané vlastní rezonanci vnitřní dutiny karoserie – prostoru pro posádku. Na tomto kmitočtu zkontrolujeme správnost interpretace veškerých způsobů měření

výsledků. Zvláštní pozornost dále věnujeme kontrole rozložení povrchových proudů na karoserii. Zaměřujeme se místa styku jednotlivých částí a zejména dodatečně vytvořených spojení pro integraci dveří, vík a vkládaných dílů ke karoserii. Z pozorování musí být patrné, že proudy těmito oblastmi volně tečou a tato spojení netvoří v jejich průchodu překážku. V případě, že zjistíme v proudové distribuci problém, je nezbytné podrobit numerický model kontrole.

- 13) Pokud byla kontrola výpočtů na testovací frekvenci v pořádku, provedeme komplexní simulaci v celém uvažovaném rozsahu. Je-li to možné, uvažujeme pro zrychlení simulace použití distribuce či paralelizace výpočtu. Většina výpočetních nástrojů touto možností disponuje.

Na základě výše uvedených komplexních poznatků provedeme předcertifikační simulaci. Její výsledky poslouží jako základ pro porovnání výsledků s předcertifikačním a certifikačním měřením v kapitolách 3 a 4.

2.6.2. SOUHRN VÝSLEDKŮ UKÁZKOVÉ PŘEDCERTIFIKAČNÍ SIMULACE

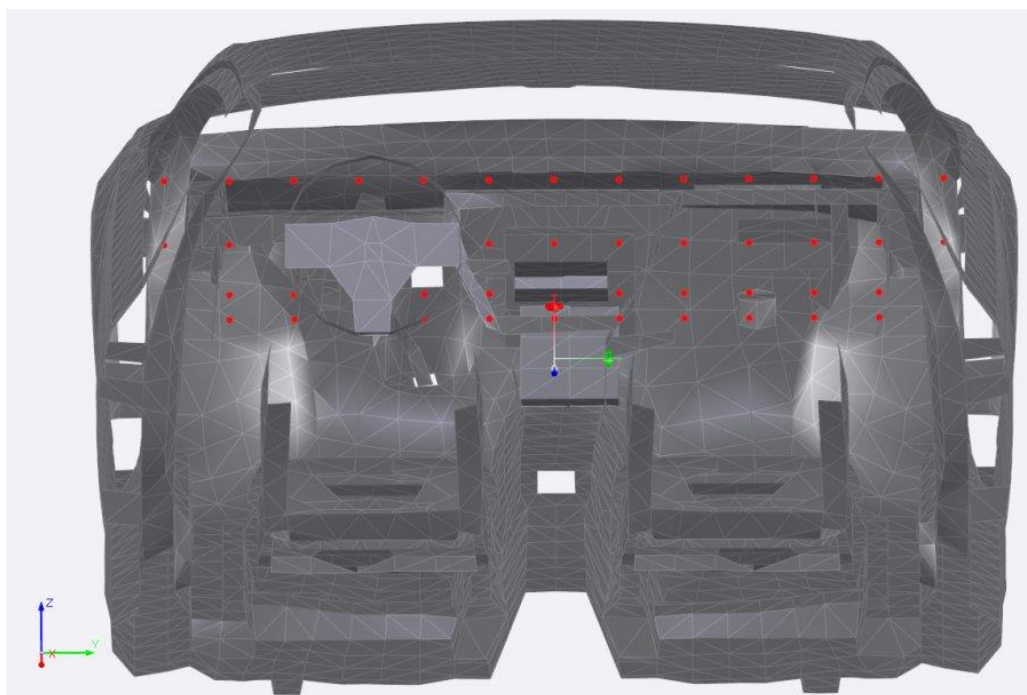
Dle doporučení z kapitoly 2.6.1 jsme realizovali kompletní numerickou simulaci rozložení intenzity elektrického pole uvnitř modelu vystrojené karoserie. Abychom mohli provést co nejvěrnější srovnání výsledků dosažených pomocí numerické simulace s výsledky předcertifikačních a certifikačních měření, použijeme shodnou metodiku expozice i vyhodnocení rozložení pole jako právě pro tato měření (detaily v kapitole 3.2.5).

Model byl exponován z čela vertikálně i horizontálně polarizovanou rovinnou vlnou s proměnnou intenzitou elektrického pole, zjištěnou při kalibraci předcertifikačního pracoviště. Při simulaci byla měřena intenzita elektrického pole v měřicích osách 1 – 4 podél výztuhy palubní desky (Obr. 64) a také v ose x (Obr. 65), sledující podélnou rovinu vozidla ve výšce panelu systému infotainmentu. Důvody pro toto rozmístění měřicích os a seskupení jednotlivých bodů v grafech vychází z metodiky měření uvedené v kapitole 3.2.5. Obecně ale vycházejí z potřeby popsat rozložení intenzity elektrického pole v místech kritických pro umístění řídicích jednotek a kabelových svazků (osa 1 až 4). V případě osy x pak zejména z důvodu porovnání vlastních rezonančních módů karoserie s teoretickým modelem a certifikačními měřeními.

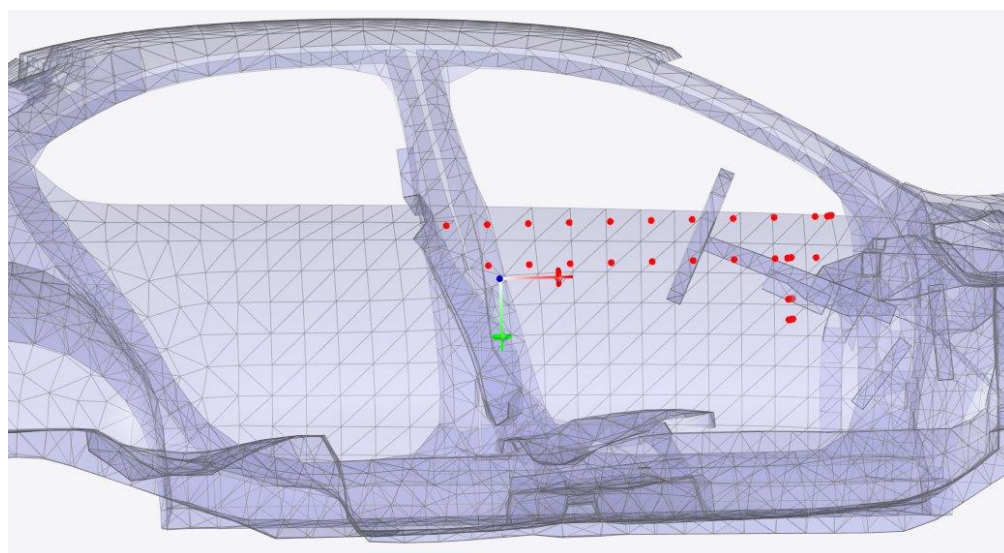
Jednotlivé měřicí body byly seskupeny do 3 oblastí, které opět logicky navazují na potřebu znalosti rozložení pole. Skupina bodů E1 až E5 představuje montážní skupinu volantu, airbagu řidiče a ostatních ovládacích prvků. V této oblasti předpokládáme nejvyšší lokální nárůst intenzity pole z důvodů blízkosti měřicích bodů k prvkům tohoto uskupení a proudům po nich tekoucích.

Body E6 až E9 představují střední část vozidla s množstvím zabudovaných řídicích jednotek, kde dominantní prvek představuje displej systému infotainmentu. V této oblasti předpokládáme zejména vliv vlastních rezonančních módů karoserie.

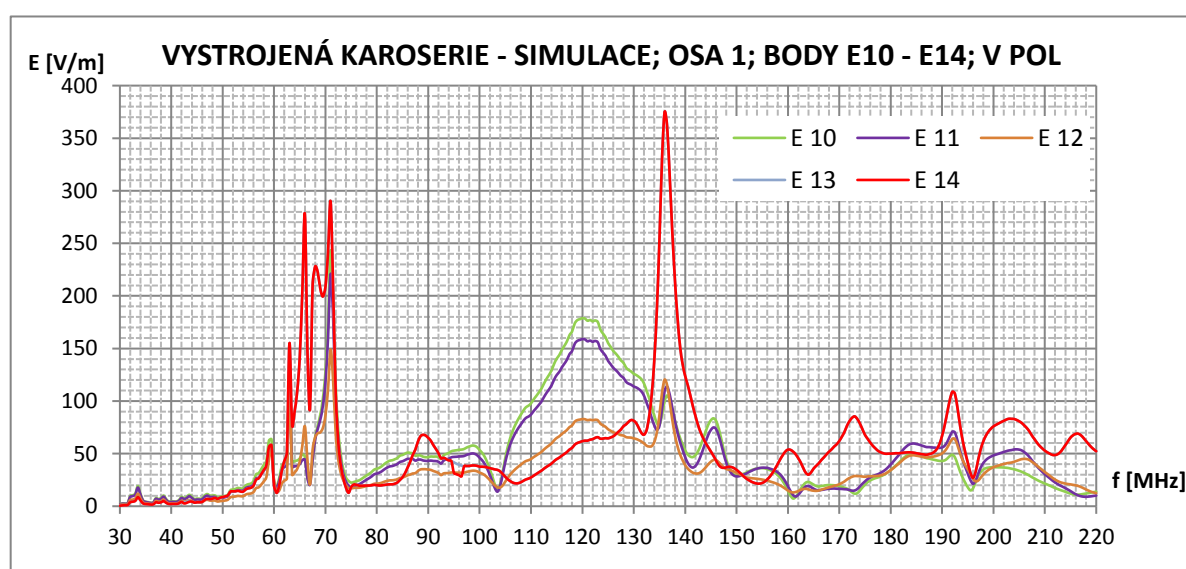
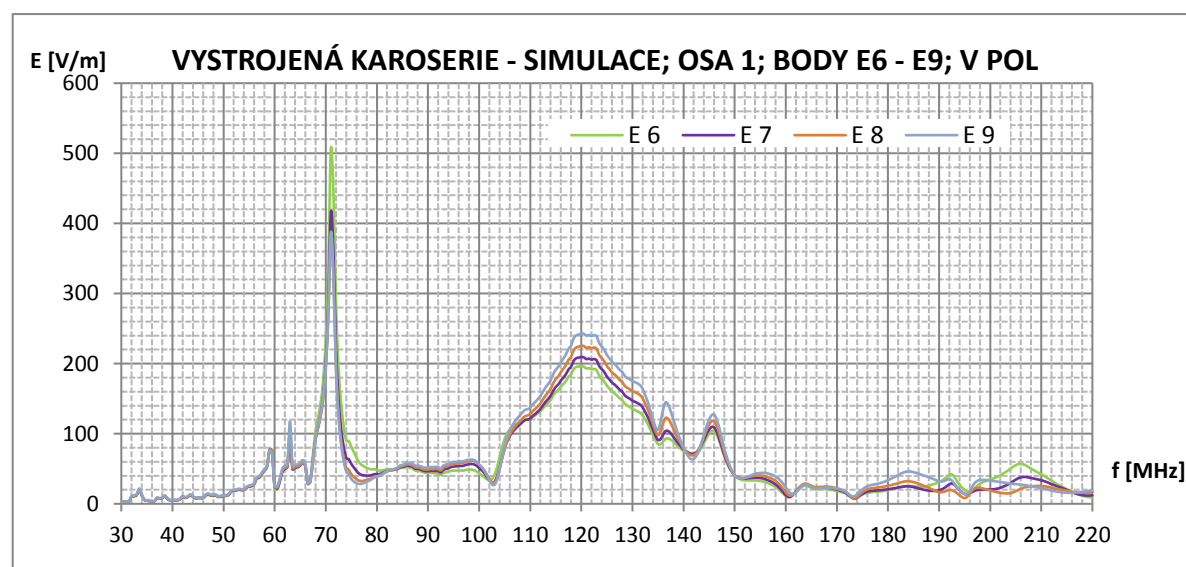
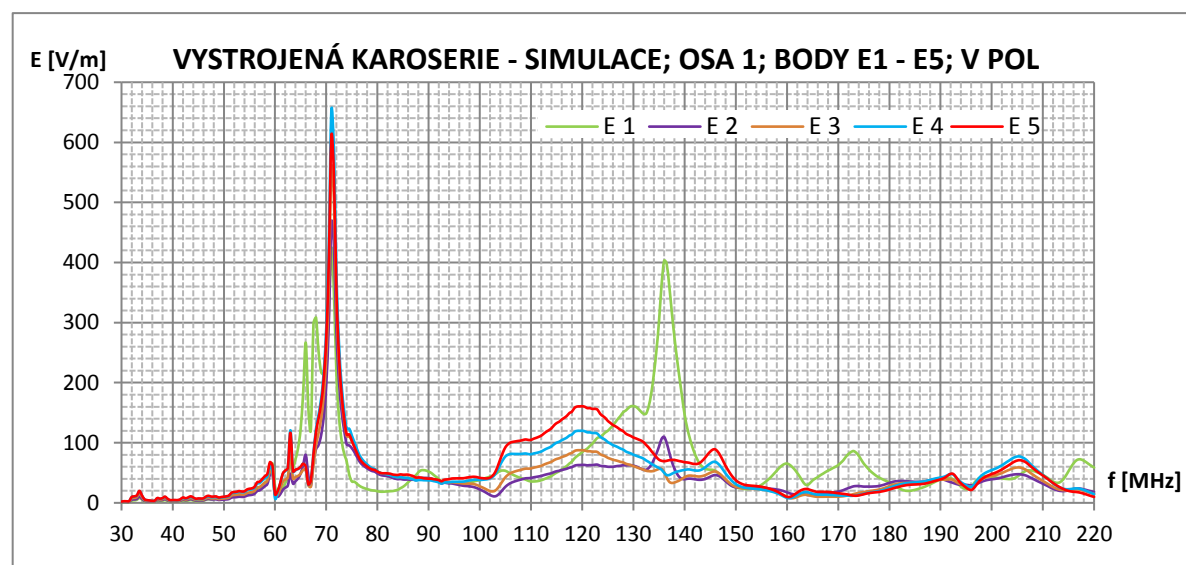
Měřicí body E10 až E14 reprezentují pravou část vnitřního prostoru vozidla s rozsáhlou oblastí umístění airbagu spolujezdce. Rozložení pole v této oblasti určuje zejména tvar výztuhy palubní desky a okrajově také vlastní rezonanční módy vnitřní dutiny. Z výše uvedených důvodů jsou výsledky simulací organizovány pro jednu osu do 3 společných grafů, vždy popisujících danou zájmovou oblast.



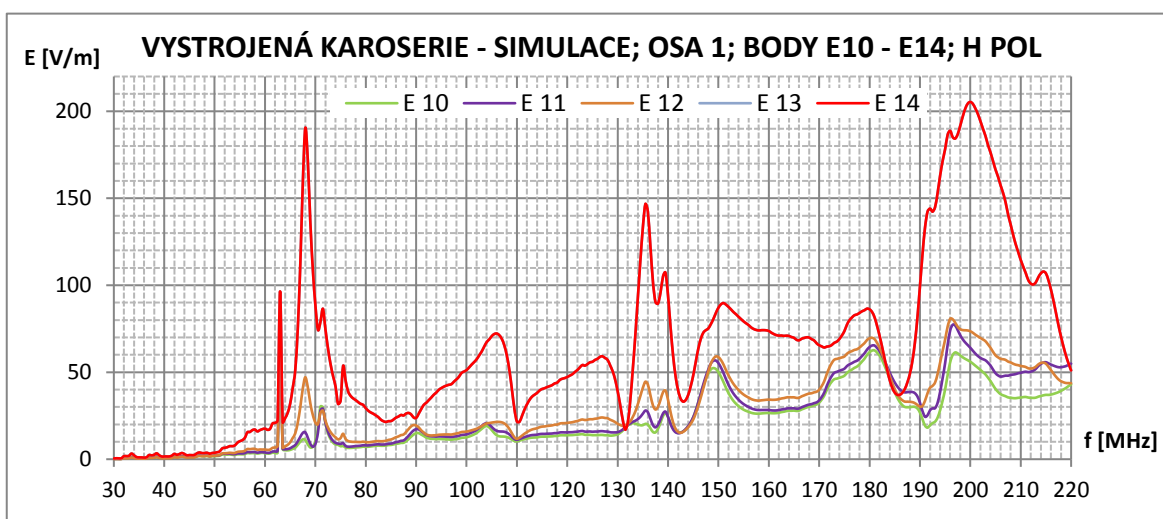
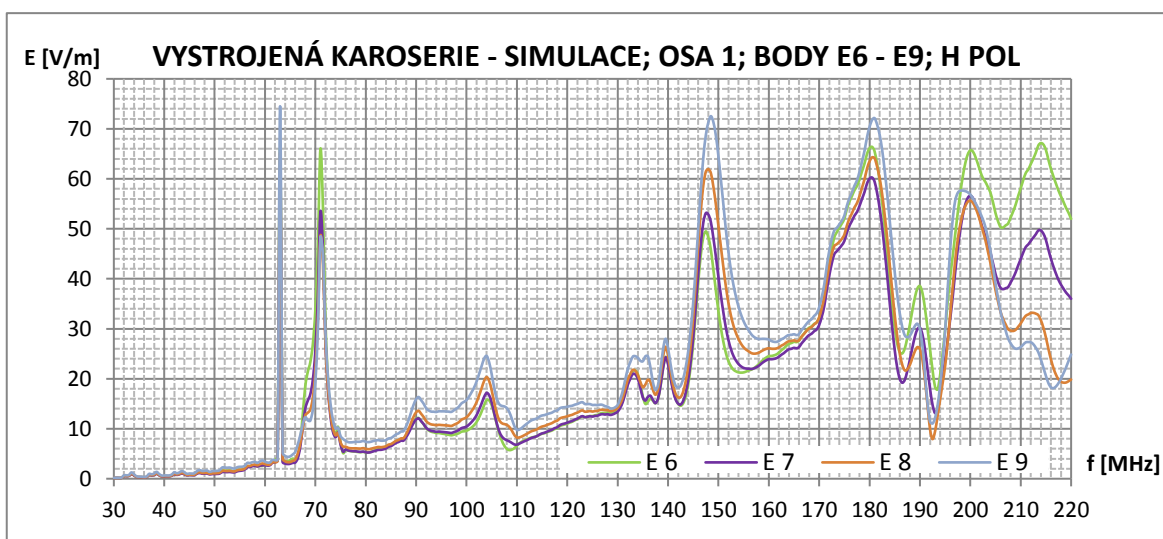
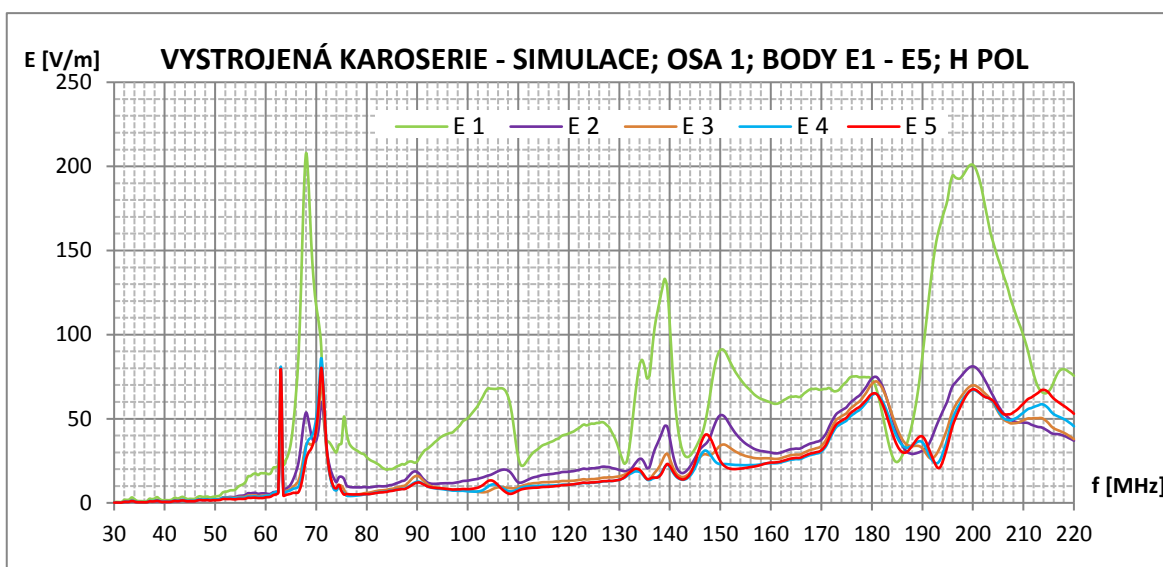
Obr. 64 – Pozice měřicích bodů v osách 1 – 4.



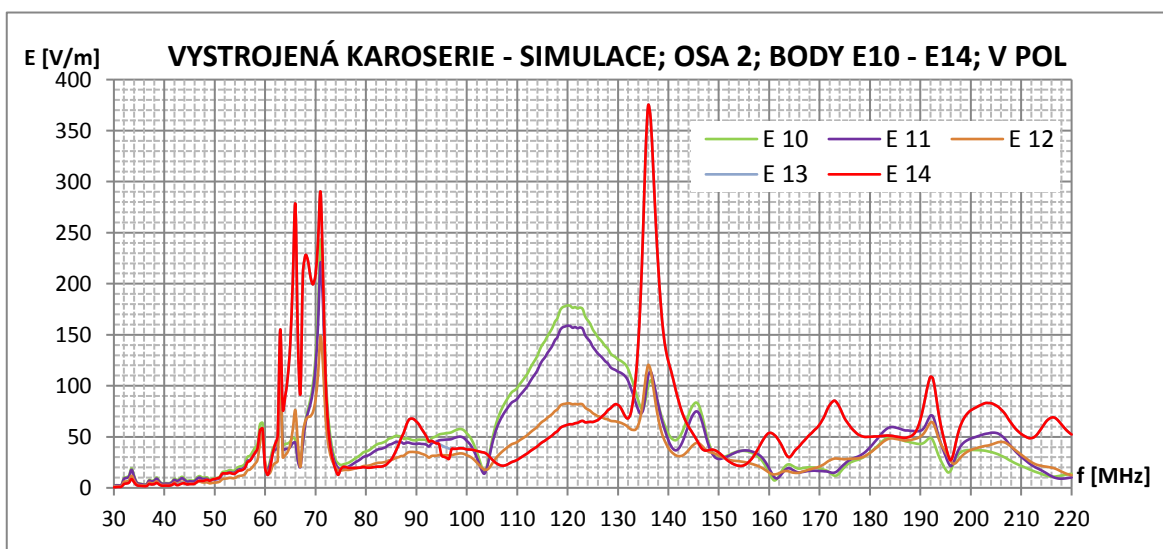
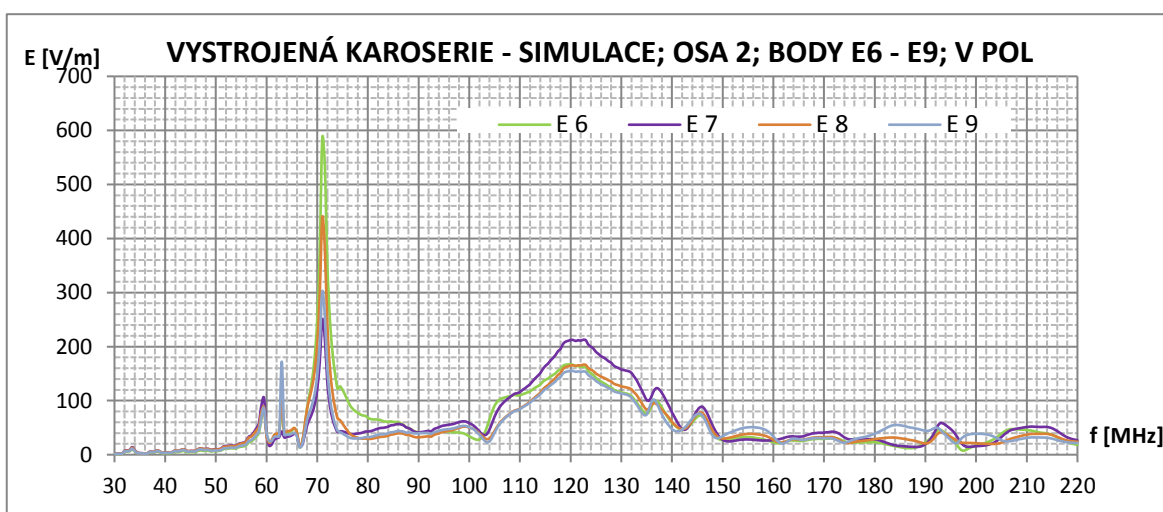
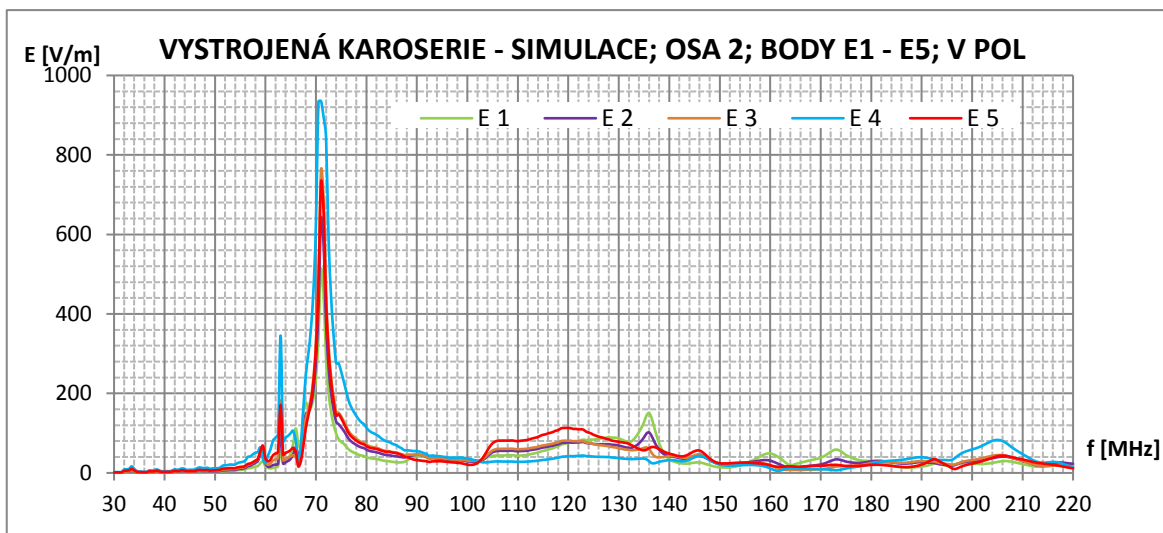
Obr. 65 – Umístění měřicích bodů v osách x.



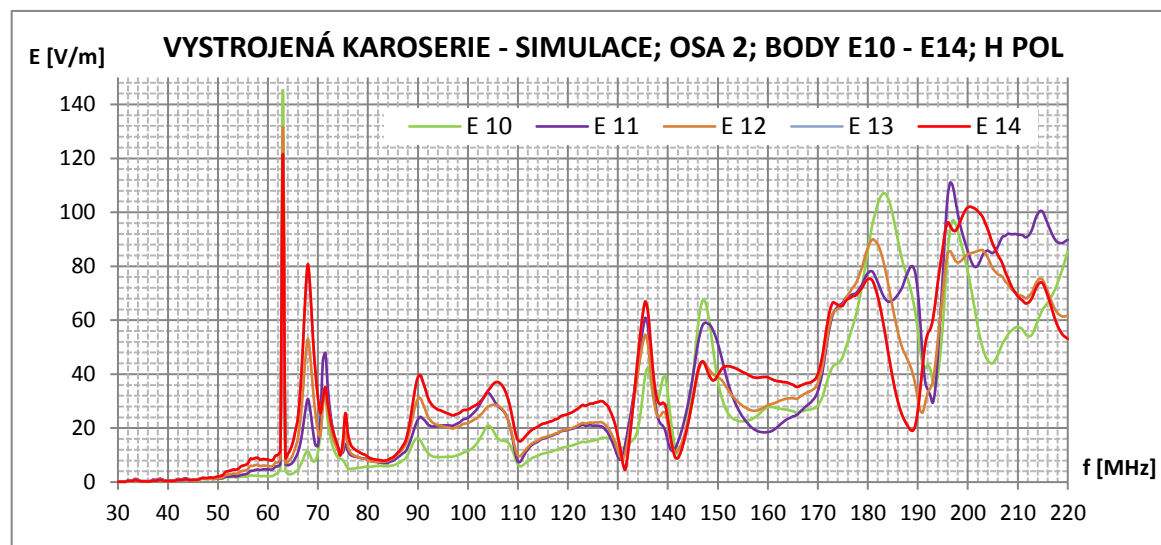
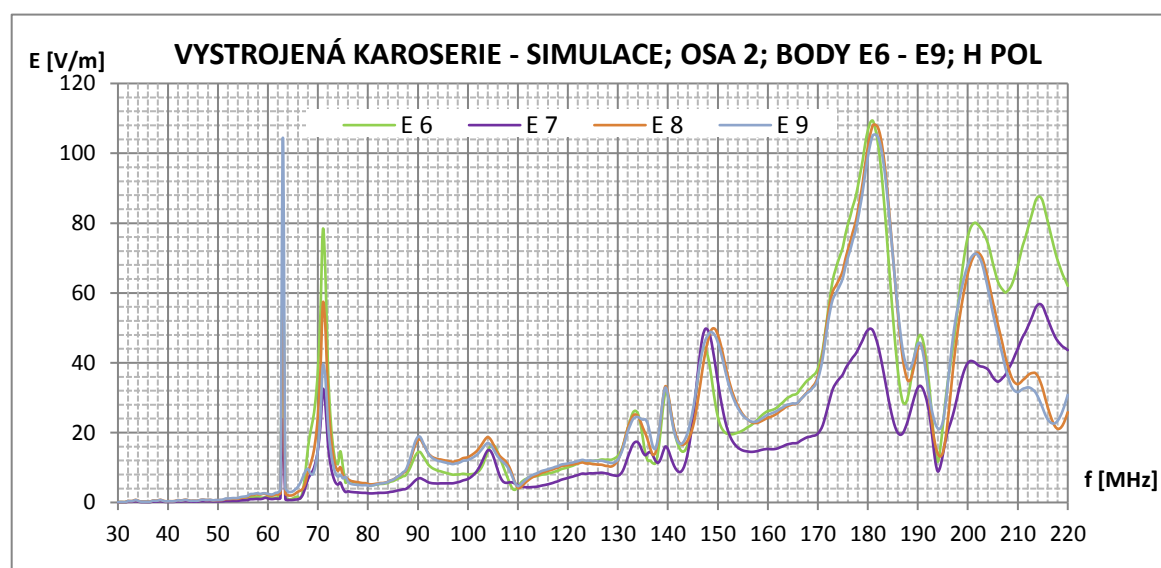
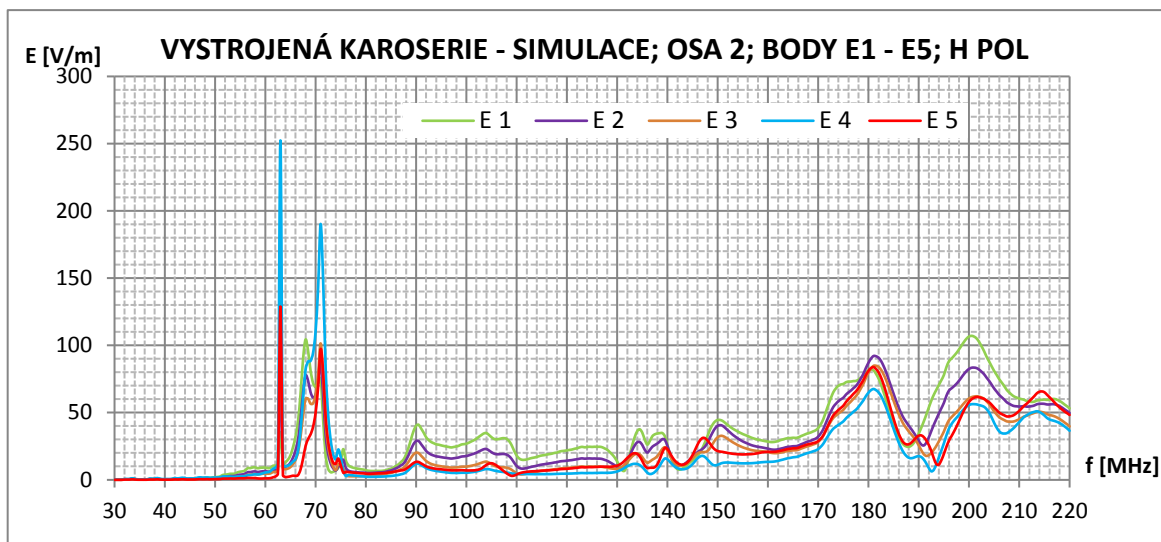
Obr. 66 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 1, vertikální polarizace, EMC Studio.



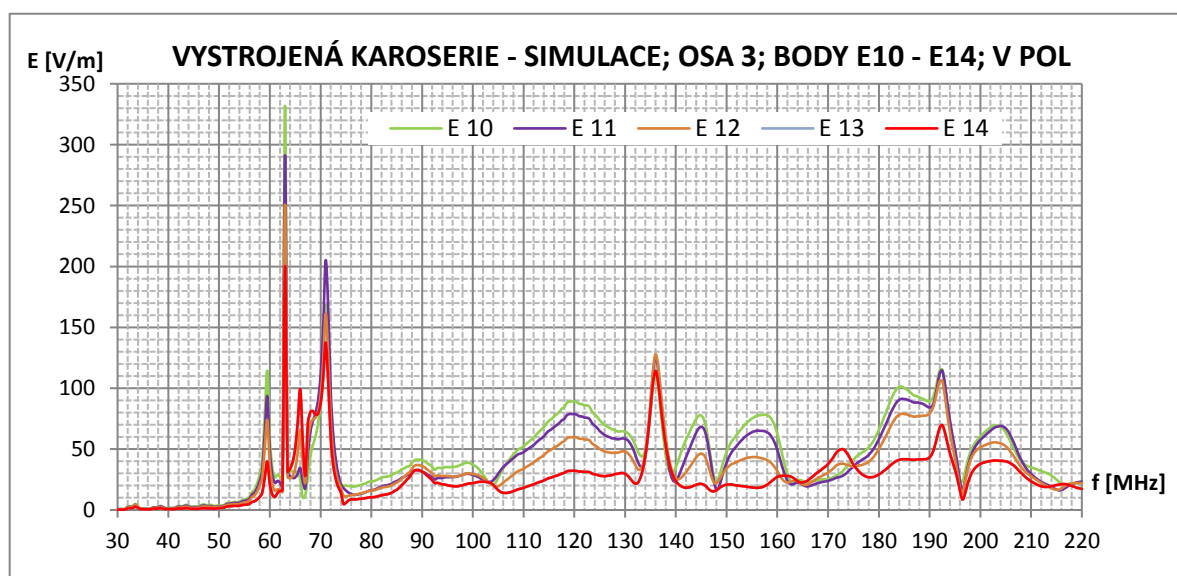
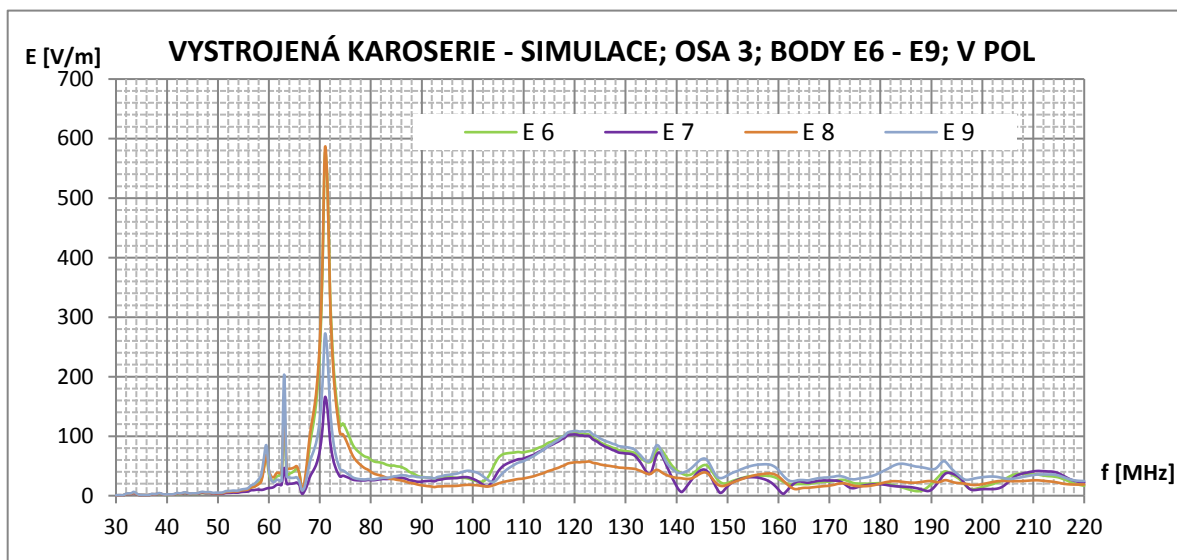
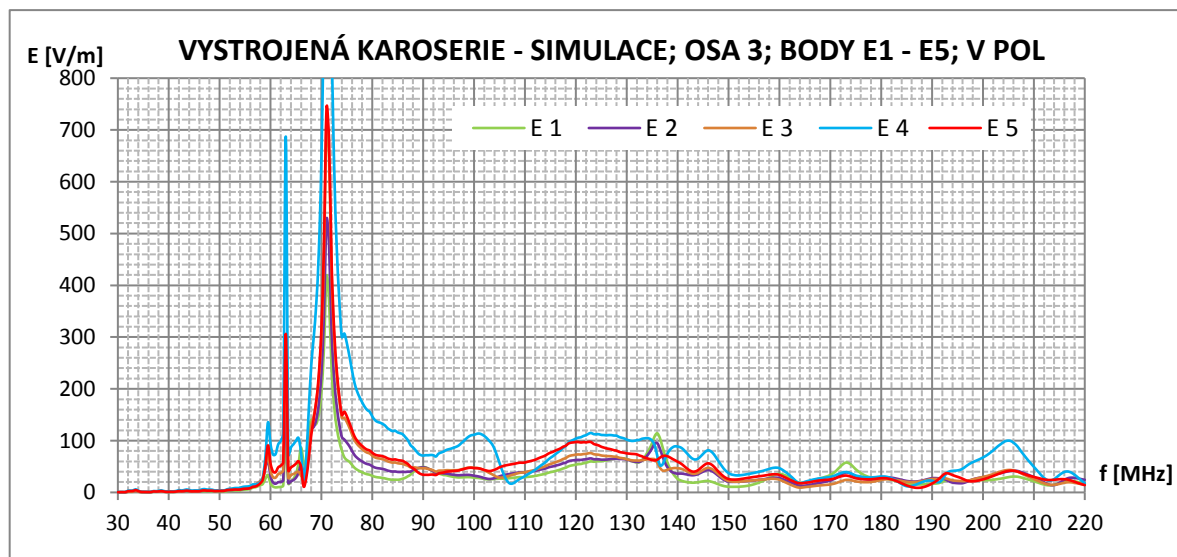
Obr. 67 - Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 1, horizontální polarizace, EMC Studio.



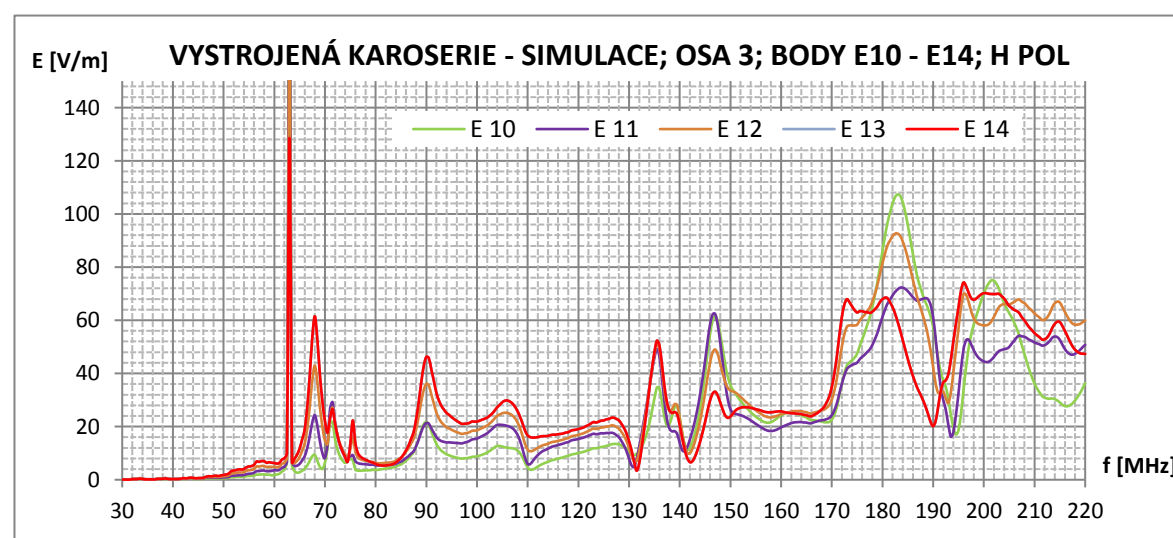
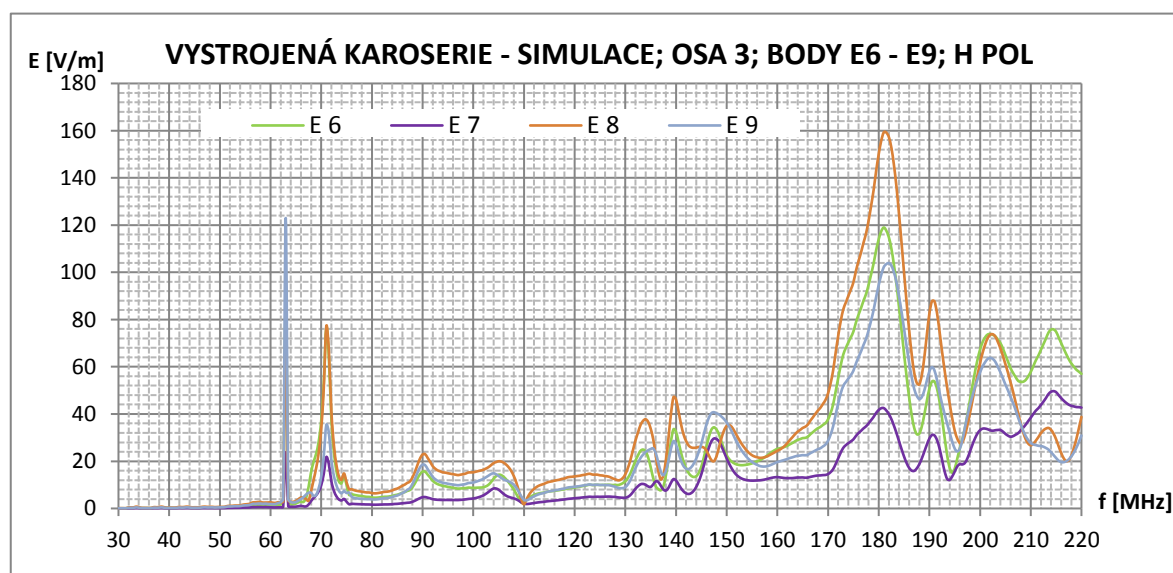
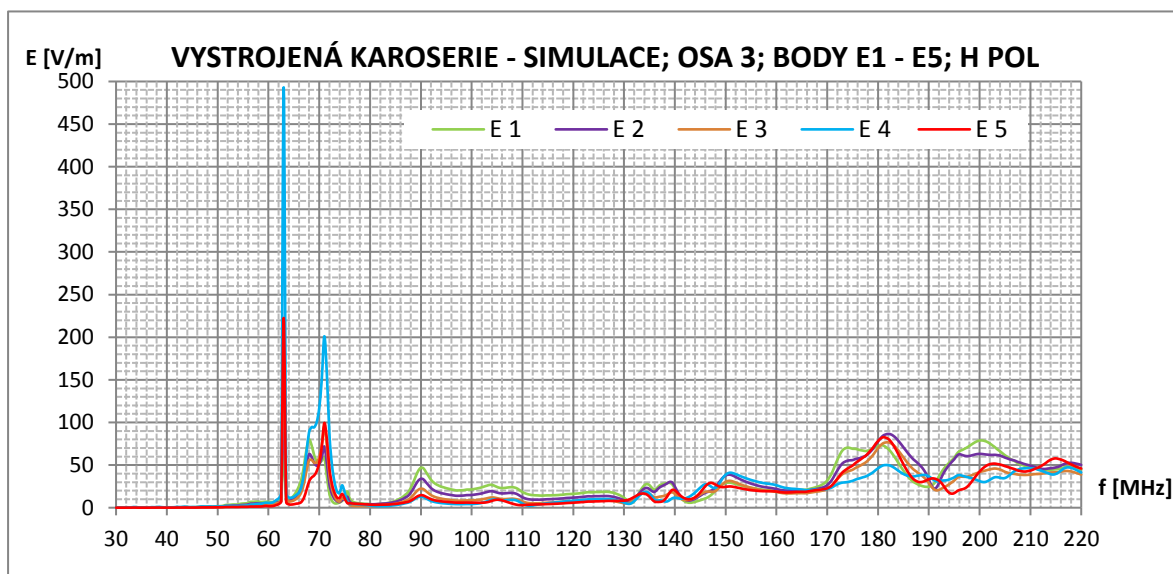
Obr. 68 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 2, vertikální polarizace, EMC Studio.



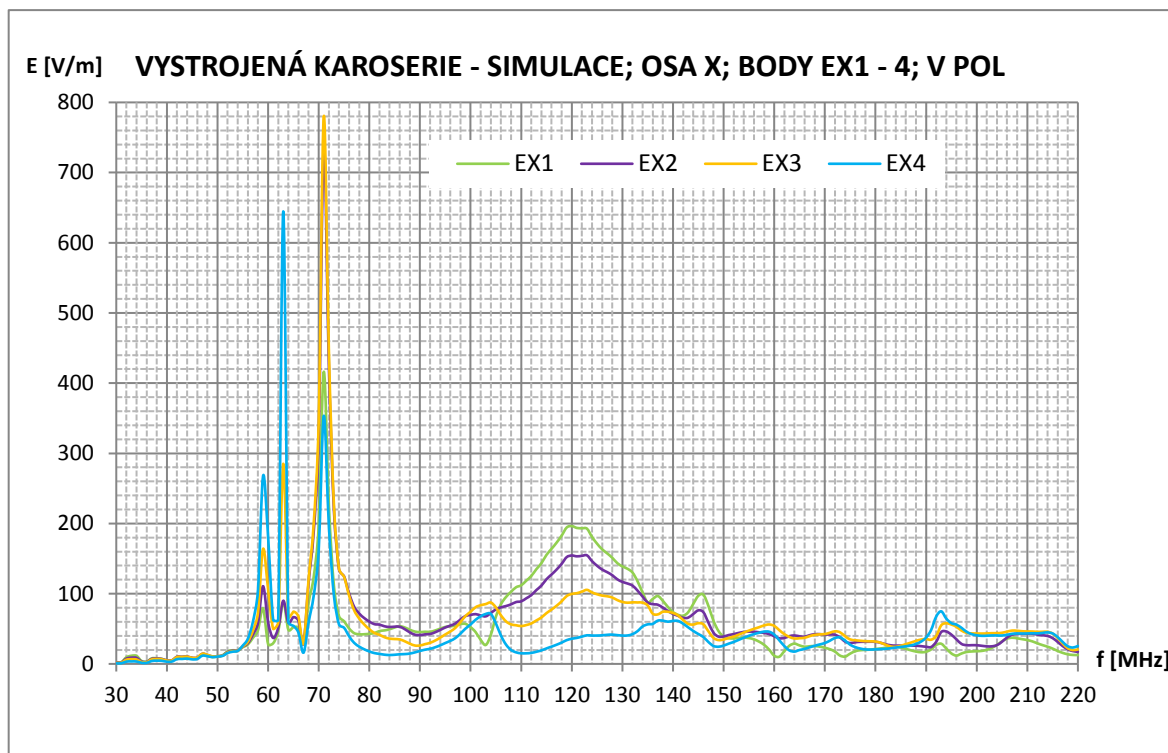
Obr. 69 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 2, horizontální polarizace, EMC Studio.



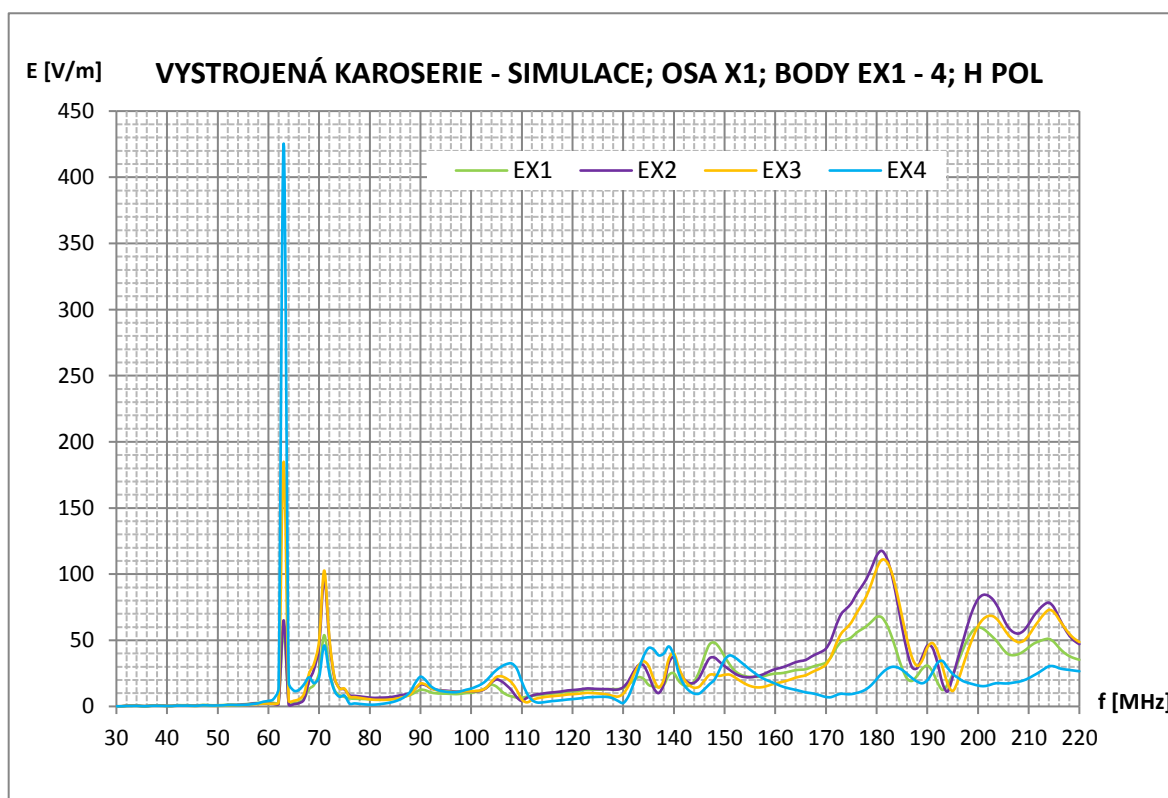
Obr. 70 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 3, vertikální polarizace, EMC Studio.



Obr. 71 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 3, horizontální polarizace, EMC Studio.



Obr. 72 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose x, vertikální polarizace, EMC Studio.



Obr. 73 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose x, horizontální polarizace, EMC Studio.

Na obrázcích (Obr. 66 až Obr. 73) můžeme pozorovat frekvenční závislost intenzity elektrického pole získanou pomocí numerické simulace provedené v prostředí EMC Studio při použití doporučení prezentovaných v kapitole 2.6.1. Při pohledu na závislost intenzity elektrického pole v ose 1 můžeme vyvodit následující závěry: Při expozici modelu vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou (Obr. 66) můžeme ve skupině měřicích bodů E1 – E5 jasně identifikovat dominantní rezonanční kmitočet 71 MHz projevující se ve všech bodech této skupiny. Jedná se o nejnižší vlastní rezonanční mód vnitřního prostoru karoserie s předpokladem projekce do všech měřicích os. Intenzita elektrického pole zjištěná zejména v bodech E2 - E4 přesahuje 500 V/m. Takto vysoká intenzita je způsobena zejména příspěvky povrchových proudů tekoucích po ideálně vodivých (PEC) prvcích sítě tvořící sestavu volantu. Vzhledem k enormně vysoké intenzitě elektrického pole ovšem nepovažujeme tento výsledek za zcela vypovídající – reálnou hodnotu intenzity očekáváme do cca 250 V/m.

Je rovněž patrný odklon od trendu výsledků v bodě E1. Tento bod je významně ovlivněn svou blízkostí k hraně karoserie a tím i očekávaného nárůstu vypočtené intenzity pole, daného použitou výpočetní metodou. Tento závěr dokladuje i mapa rozložení povrchových proudů. Oblast bodů E6 až E9 vykazuje na rozdíl od předchozí skupiny více očekávané výsledky. Opět se zde projevuje dominantní rezonanční kmitočet 71 MHz, doplněný navíc zde i o frekvenci 120 MHz, která se v případě přechodu skupiny bodů jako rezonanční projevovala pouze okrajově. Rozložení intenzity elektrického pole v oblasti bodů E10 až E14 je značně ovlivněno dvěma základními jevy: přítomností úchytných řídicích jednotek na výztuze palubní desky a rozložením povrchových proudů na dveřích spolujezdce, včetně blízkosti vodivého napojení dveří do zbytku karoserie (vysoká proudová hustota na segment). Oba tyto aspekty výrazně mění průběhy intenzity elektrického pole v jednotlivých bodech k těmto místům náležejícím. Body E12 a E13 od poloviny sledovaného pásma jasně zaznamenávají pokles intenzity způsobený zeslabením vazby z vnějšího prostředí způsobený právě zmíněnou výztuhou. Bod E14 je pak stejně jako bod E1 ovlivněn proudy tekoucími po karoserii vozidla a vykazuje zcela odlišné chování než body umístěné více uvnitř karoserie. Vzhledem k podobnosti výsledků v jednotlivých skupinách můžeme při dané konfiguraci karoserie uvažovat v budoucnu použití pouze reprezentačních bodů umístěných vždy v dané skupině (volant, střed vozidla, airbag spolujezdce).

Při expozici modelu horizontálně polarizovanou rovinnou vlnou (Obr. 67) jsme získané výsledky rozdělili do skupin stejným způsobem jako v předchozím případě. Souhrnně při expozici horizontální polarizací nenacházíme ve sledovaném frekvenčním pásmu významné rezonanční fenomény, neboť tvar vnitřní dutiny neodpovídá svými rozměry podmínkám pro vznik nejnižších, a tedy nejintenzivnějších rezonančních módů. Plošně zaznamenáváme vznik těchto fenoménů až na frekvenci 147 MHz a 179 MHz.

Ve skupině měřicích bodů E1 až E5 se opět velmi výrazně od trendu odchyluje bod E1, ovlivněný jako v předchozím případě blízkostí dveří vozidla a jeho rezonanční charakteristika spíše odpovídá vlastní rezonanci této části vozu než vnitřního prostoru. U bodů E3 a E4 můžeme pozorovat vliv sloupku řízení, projevující se na již známé frekvenci 71 MHz.

Tato frekvence se ostatně projevuje i v další skupině bodů E6 až E9 jako rezonanční, ovšem zjištěná intenzita elektrického pole je až desetinásobně nižší než v případě vertikální polarizace. Hodnoty intenzity zjištěné v jednotlivých bodech se příliš neliší, což je dáno lineárním uspořádáním prvků tvořících tuto oblast a rozsahem rezonančních fenoménů v daném frekvenčním pásmu. Můžeme tak pozorovat rezonanční kmitočty 147 a 179 MHz, které se oproti vertikální polarizaci stávají dominantními.

V případě horizontální polarizace se ve skupině bodů E10 až E14 neprojevuje výrazným způsobem vliv úchytů řídících jednotek na výztuže palubní desky, který u vertikální polarizace působil lokální snížení vazby vnějšího prostředí a tím pokles zjištěné intenzity elektrického pole. Naopak se stejně jako u bodu E1 i v bodu E14 výrazným způsobem projevuje vliv dveří vozidla, který má oproti jiným, ze stejných důvodů jako u E1, zcela odlišnou rezonanční charakteristiku.

I v tomto případě můžeme konstatovat, že by bylo možno s dobře vypovídajícím výsledkem zjišťovat intenzitu elektrického pole pouze v reprezentačních bodech, umístěných do cílových částí vnitřního prostoru, tedy do oblastí volantu, středu vozidla, airbagu spolujezdce.

Při analýze měřicích bodů náležících do osy 2 (vertikální polarizace - Obr. 68, horizontální polarizace - Obr. 69) získáváme velmi podobné výsledky jako při analýze výsledků osy 1. Pouze v dílčích částech dochází ke změnám zjištěné intenzity elektrického pole. Prvním z těchto bodů je E1 při vertikální polarizaci, kde je zřejmé snížení vlivu vazby dveří vozidla na tuto sondu. Situace je způsobena tím, že měřicí bod je umístěn cca 10 cm pod hranou dveří, navíc u vyklenující se dutiny dveří, kde již nedochází k tak silnému ovlivnění proudy tekoucími po jejich hraně. Oproti tomu bod E14 (vertikální polarizace) vykazuje téměř shodné chování jako v ose 1, tedy bez patrné změny vazby. Toto chování nedovedeme při symetrii konstrukce dveří i umístění bodů zcela spolehlivě vysvětlit, v úvahu připadá pouze proud tekoucí výztuhou palubní desky od místa připojení dveří do zbytku karoserie, nebo ojedinělá chyba numerické metody.

Naopak porovnání výsledků osy 2 v horizontální polarizaci (Obr. 69) ukazuje v bodech E1 a E14 shodné výsledky, které v obou případech potvrzují podstatné snížení vazby rezonujících dveří vozidla na sondy v jejich blízkosti umístěné. Jediný podstatný rozdíl oproti ose 1 spatřujeme ve zvýšení intenzity elektrického pole v místech panelu infotainmentu (body E6 – E8), dané blízkostí měřicích bodů ke kovovému rámečku této součásti.

Analýza bodů v ose 3 při vertikální polarizaci zkušební pole (Obr. 70) ukazuje na další zeslabení vlivu dveří vozidla v rezonanci na body E1 a E14. Tato skutečnost vyplývá z ještě hlubšího umístění těchto měřicích bodů v karoserii. Dominantní nadále zůstává frekvence 71 MHz ve všech bodech, intenzita elektrického pole zjištěná na této frekvenci však výrazně stoupá ke středu vozidla – panelu infotainmentu. Při pohledu na mapu rozložení proudů tekoucích po karoserii se jasně ukazuje, že růst intenzity v těchto bodech je způsoben enormním nárůstem proudové hustoty na jednotlivých elementech tvořících rámeček tohoto panelu a blízký sloupek řízení při dané rezonanční frekvenci. Zbytek bodů vykazuje obdobné chování jako v ose 2, pouze můžeme pozorovat další pokles vazby v oblasti bodů E11 a E12, v ose 1 výrazně ovlivněných výztuhou palubní desky. Nově se ukazuje frekvenčně úzký fenomén na 63 MHz, projevující se pouze v bodech E4, E5 a E9. Jeho výskyt souvisí s umístěním daných bodů do spodní části výztuhy karoserie, po které na dané frekvenci tečou významné proudy z okolních částí karoserie, zejména z konstrukce sedadel, která se nachází na dané frekvenci v rezonanci.

V případě porovnání výsledků osy 3 při horizontální polarizaci zkušební pole (Obr. 71) pozorujeme stejně jako u vertikální polarizace nový výrazný rezonanční fenomén na frekvenci 63 MHz, zde navíc lokalizovaný i v bodech E12 a E13. Tato výrazná změna oproti hodnotám intenzity elektrického pole zjištěným v osách 1 a 2 je způsobena blízkostí této měřicí osy spodním částem výztuhy s přímou vazbou na podlahu vozidla, po které se šíří proudy tekoucí z prostoru sedadel, nacházejících se na dané frekvenci ve výrazné rezonanci. Dále se zvyšuje intenzita elektrického pole zjištěná

v bodech E6 až E8 v horní části zkoumaného pásma, kdy maximum dosahuje až 160 V/m. Tento jev způsobuje vlastní rezonance této sestavy, kde se na frekvenci 180 MHz dostává rozměr vertikálních prvků, na kterých je rámeček nesen, do rozměru $\lambda/4$ příslušné vlnové délky.

Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose x byla zkoumána zejména z hlediska porovnání správnosti výsledku získaného pomocí numerických metod a certifikačních měření. Z výsledků expozice vertikálně polarizovanou vlnou (Obr. 72) vyplývají tři zásadní frekvence, ukazující na rozložení rezonančních fenoménů v karoserii. Při frekvenci 63 MHz dochází k významné rezonanci konstrukce předních sedadel (délka vertikálních prvků výztuhy sedaček je 1,2 m, což téměř přesně odpovídá $\lambda/4$ vlnové délky při frekvenci 63 MHz), což jasně potvrzuje distribuce proudů na površích elementů modelu, ale i významný nárůst intenzity elektrického pole v bodě EX4, umístěného mezi sedadly řidiče a spolujezdce. V dalších bodech EX3, EX2 a EX1 intenzita na této frekvenci postupně klesá. Nejvýznamnější rezonanční fenomén nastává na již známé frekvenci 71 MHz. Vzhledem k rozložení intenzity elektrického pole mezi jednotlivé měřicí body se jedná o prostorově rozloženou rezonanci vnitřní dutiny karoserie s maximem uprostřed prostoru mezi předními sedadly a palubní deskou (měřicí bod EX3). Poslední, rezonančně významná frekvence 120 MHz je oproti tomu lokalizována spíše v přední části vozu (body EX1 a EX2), kdy opět vzhledem k délce dochází k rezonanci vodorovných částí konstrukce sloupku řízení.

Analýza frekvenční závislosti při expozici horizontálně polarizovanou vlnou (Obr. 73) ukazuje opět na výraznou rezonanci konstrukce sedadel na frekvenci 63 MHz a podstatně potlačenou prostorovou rezonanci dutiny na 71 MHz. K těmto známým projevům přibývá frekvence 179 MHz s maximem lokalizovaným mezi body EX2 a EX3. Jedná se proto o další vlastní rezonanční frekvenci dutiny, vybuzenou právě na základě zkoušky horizontálně polarizovanou vlnou. Je ovšem nutno konstatovat, že maximální zjištěná hodnota intenzity elektrického pole činí 110 V/m, což je pouze 1/5 maximální intenzity při rezonanci na frekvenci 71 MHz a vertikální polarizaci.

2.6.3. ZÁVĚR

Výsledky diskutované v kapitole 2.6.2 demonstrují použitelnost doporučení daných v kapitole 2.6.1. V předem definovaných měřicích osách jsme stanovili frekvenční závislost intenzity elektrického pole při expozici vertikálně i horizontálně polarizovanou vlnou. Nalezli jsme kritické frekvence: 63, 71, 120 MHz pro vertikální polarizaci a 63, 71, 147 a 179 MHz pro polarizaci horizontální. Při pozorování rozložení intenzity pole jsme došli k závěru, že dané frekvence jsou v případě 71, 147 a 179 MHz vlastními rezonancemi vnitřního prostoru karoserie a 63 MHz velmi výraznou rezonancí dominantních vertikálních prvků konstrukce sedadel. Výsledky získané v kapitole 2.6.2 budeme dále konfrontovat s předcertifikačními a certifikačními měřeními, abychom mohli jednoznačně potvrdit správnost doporučení daných pro předcertifikační numerickou simulaci.

2.7. SHRUTÍ KAPITOLY

Kapitola 2 této práce podrobně diskutovala možnosti provádění předcertifikačních zkoušek elektromagnetické odolnosti vozidel pomocí numerických simulací. Byly zde postupně diskutovány nejdůležitější aspekty provádění numerických simulací elektromagnetické odolnosti vozidel. Jednotlivé poznatky byly utříděny do jednotných doporučení pro provádění předcertifikačních numerických simulací.

Kapitola 2.1

V této kapitole jsou popsány základní aspekty problematiky. Z nich vyplývá, že základní témata umožňující získat celkový přehled nad chováním vozidla z hlediska elektromagnetické odolnosti tvoří:

- 1) Analýza vnitřního prostředí karoserie, včetně modální analýzy. Cílem tohoto zkoumání je poznat rozložení intenzity elektrického pole ve vnitřních dutinách karoserie za účelem identifikace rizikových míst. V rámci této analýzy musí být rovněž rozpoznány vlastní rezonanční frekvence této dutiny a provedeno primární stanovení maximálních intenzit polí vznikajících uvnitř karoserie.
- 2) Analýza chování kabelových svazků. V rámci této analýzy je nutno prověřit vzájemný přeslech mezi jednotlivými vodiči v kabelovém svazku, zvláště v situaci, kdy se v jednom svazku potkávají zatížené silové vodiče a vodiče signální. Rovněž musí být prověřen důsledek expozice svazků vůči vnějšímu poli a analýza jevů z toho plynoucích.
- 3) Analýza zemního konceptu vozidla. Analýza zemních bodů je důležitá z hlediska rozložení proudů tekoucích po vodivé karoserii vozidla a případných problémů plynoucích z jejich nevhodného umístění. Důležité je též posouzení maximální délky zemních vodičů a společných tras s jinými signálovými, či silovými vodiči.
- 4) Analýza anténních prvků. Z hlediska elektromagnetické odolnosti jsou vozidlové antény a zejména jejich impedanční členy vystaveny extrémní zátěži, na kterou musí být vhodně dimenzovány. V rámci analýzy tak musíme stanovit aspoň orientační požadavky na jejich selektivitu, strmost vstupních filtrů, apod.

Dále byly v kapitole 2.1.1 diskutovány možné výpočetní metody a nástroje, pomocí kterých můžeme provést analýzu vyplývající z předchozích bodů. V úvodu práce (kapitola 1.3.2) byly popsány v současnosti dostupné numerické metody vhodné pro řešení problémů v oblasti automobilové EMC. Bylo zmíněno, že není reálné používat veškeré zmíněné metody a postupy. Pro řešení problematiky byl vybrán v koncernu VW standardně využívaný komplexní nástroj EMC Studio, využívající pro svoji funkci Method of Moments (MoM), Method of Auxiliary Sources (MAS), Transmission Line Method (TLM) a síťovou analýzu (řešiče SPICE/PSPICE/HSPICE nebo DOLPHIN-SMASH VHDL-AMS). Získané výsledky pak budou verifikovány pomocí FDTD aplikované v CST MWS (licence VUT Brno).

Kapitola 2.2

Cílem této kapitoly byla verifikace vybraných numerických metod pomocí standardního problému a rovněž teoretická analýza řešeného problému. V kapitole 2.2.1 byla provedena analýza pomocí Slaterovy poruchové metody umožňující matematický popis kvality rezonátoru, za který můžeme vnitřní prostředí karoserie vozidla považovat.

Byly rovněž definovány základní matematické vztahy pro první přiblížení k výpočtu vlastních rezonančních frekvencí této dutiny. Na základě získaných teoretických poznatků jsme v kapitole 2.2.2 navrhli testovací model rozměrech $x = 1450$ mm, $y = 1780$ mm, $z = 980$ mm, respektující skutečné rozměry vnitřní dutiny vozu Škoda Octavia 3. generace, sloužící k ověření správnosti uvažovaných numerických metod řešení MoM a FDTD, aplikovaných v prostředích EMC Studia a CST MWS. U tohoto modelu jsme zanedbali zakřivení střechy, předního a zadního okna daná reálným tvarem karoserie, neboť do kritické frekvence 300 MHz, která je zde uvažována jako hraniční, nemají tyto tvary na rozložení elektrického pole vliv. Naopak byly podrobně analyzovány a navrženy náhradní rozměry otvorů v rezonátoru – prostor pro okna.

V kapitole 2.2.3 jsme ověřovali shodu obou numerických metod při výpočtu rozložení intenzity elektrického pole jak v řezných rovinách vedených modelem, tak i pomocí virtuální sondy elektrického pole. Došli jsme k závěru, že obě použité numerické metody dosahují dobré shody výsledků. Předpokladem je ovšem správná definice rozměrových a materiálových parametrů testovacího modelu a způsobu jeho buzení. Podrobnou analýzou vnitřního prostředí jsme dospěli k závěru, že při expozici testovacího modelu vertikálně polarizovanou vlnou z čela je hlavní příspěvek celkové intenzity elektrického pole E tvořen složkou E_z . Ostatní složky E_y a E_x mají v této situaci pouze okrajový vliv. Tento pozorovaný jev odpovídá teoretickým předpokladům, neboť právě ve směru osy z měřicí sondy kmitá vektor elektrické intenzity \vec{E} přicházející rovinné vlny. Obdobně při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou tvoří hlavní příspěvek $|E_{tot}|$ složka E_y . Shodných poznatků jsme dosáhli i pro expozici testovacího modelu z boku.

Provedli jsme rovněž objektivní porovnání výsledků pomocí metody FSV s velmi dobrým výsledkem, ukazujícím jak dobrou shodu výsledků obou numerických metod, tak praktičnost a funkčnost dané metody. Na základě tohoto zjištění budeme dále metodu FSV používat jako výchozí pro porovnání výsledků numerických simulací s předcertifikačními i certifikačními měřeními.

Kapitola 2.3

V této kapitole byly rozebírány metody přípravy numerických modelů pro simulaci, včetně řady problémů, které jsou s touto problematikou spojeny. Vzhledem k tomu, že cílem hodnotné EMC simulace je přinést důležité informace pro vývojový proces výrobku, musí být proto vhodně začleněna do jeho postupného vývoje. Příprava simulačního modelu proto musí být efektivní a dostupná. Je nutno nalézt synergii mezi EMC odděleními a útvary zabývajícími se konstrukcí vozu a CRASH modelováním, kde lze s výhodou výchozí modely vozů získat. Byly identifikovány základní aspekty, které musí být vyřešeny při získávání numerického modelu:

- 1) redukce extrémní nadbytečnosti dat původního modelu,
- 2) odstranění nadbytečných povrchů redukovaného modelu,
- 3) volba vhodného rozdělení modelu na funkční celky,
- 4) definice velikost sítě modelu,
- 5) korekce chyb,
- 6) kontrola výsledného modelu.

Při přípravě numerického modelu se můžeme setkat s řadou problémů, které mohou zapříčinit zcela nereálný výsledek numerické simulace, nebo významným způsobem poškodit jeho přesnost. Pro zajištění odpovídající kvality jsme stanovili základní pravidla pro diskretizaci modelu.

- 1) Respektování fázově závislých distribucí proudů a nábojů podél struktury modelu. Maximální velikost segmentu je $1/10$ nejkratší vlnové délky.
- 2) Použití lokálně vyšší hustoty diskretizace v blízkosti hran modelu a dutin.
- 3) Respektování hraničního poměru 1:5 jednotlivých stran trojúhelníkového segmentu.
- 4) Zvýšení lokální hustoty sítě (sub-mesh) v blízkosti simulovaných vodičů z důvodu vysokého gradientu proudu a náboje.
- 5) Stanovení maximálního poměru mezi délkou a průměrem drátěného segmentu (včetně tloušťky opláštění) na 3.
- 6) Zajištění správné návaznosti trojúhelníkových segmentů: segmenty se navzájem nesmí překrývat, protínat a musí být připojeny skrze společné koncové body.

Byla provedena rovněž analýza vhodné velikosti segmentu modelu vzhledem k maximální zkoumané frekvenci při dodržení podmínky ($< \lambda_{MAX} / 10$). Byly stanoveny základní velikosti segmentů a to 150 mm pro hrubý model na jednoduché experimenty a 80 mm pro standardní model s použitím sub-meshingu na náročné experimenty s horním frekvenčním omezením 375 MHz.

Kompletní model vozidla byl dle výše uvedených zásad rozdělen na jednotlivé funkční celky.

- a) Model okované a montované karoserie (svařený skelet vozidla a montované dveře a víka).
- b) Další vkládané prvky, mající zásadní vliv na změnu elektromagnetického prostředí vnitřní dutiny vozidla – agregát, přední náprava, výztuha palubní desky a konstrukce sedadel.

Kapitola 2.4

V kapitole byly diskutovány otázky zjednodušení numerického modelu a vlivu zanedbání jeho jednotlivých částí na rozložení zkoumaného elektrického pole. Z teoretických předpokladů uvedených v kapitole 2.2.2 jsme usoudili, že umístění jednotlivých komponent do vnitřního prostoru karoserie významným způsobem změní rezonanční chování této dutiny. Předpokládáme posun vlastních rezonančních frekvencí dutiny směrem vzhůru a značné zvýšení lokální intenzity elektrického pole na hranách experimentálně vkládaných komponent.

Vlastní experiment byl proveden na modelech vozů Škoda Rapid a Škoda Octavia 3. generace pomocí vertikálně polarizované rovinné elektromagnetické vlny s konstantní intenzitou elektrického pole. Sledovaným parametrem byla změna rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu karoserií vozidla, proudy tekoucí po karoserii a numerické hodnoty získané virtuálními sondami elektrického pole. Jako testovací frekvence byla pro vůz Škoda Rapid vybrána $f = 68$ MHz a pro vůz Škoda Octavia $f = 178$ MHz.

Řadou numerických simulací byly zkoumány konfigurace vycházející z maximálního modelu tvořeného: karoserií, agregátem, přední nápravou, výztuhou palubní desky a výztuhou sedadel. Na základě výsledků získaných během výše definované analýzy jsme došli k následujícím zjištěním.

- 1) Vnitřní prostor karoserie se v každé konfiguraci chová jako dutinový rezonátor s proměnnými přirozenými rezonančními módy. Míra jejich změny závisí na umístění vnitřní výbavy vozidla. Tyto vložené části (výztuha palubní desky a konstrukce sedadel) fungují jako „clony“ měnící elektrické rozměry vnitřní dutiny a posouvají tak rezonanční kmitočty.
- 2) K lokálnímu zvýšení proudové hustoty došlo zejména na horní hraně střechy vozidla a také na rámech oken ve dveřích. Byla zjištěna také vysoká proudová hustota v místech „virtuálních pantů“ zejména předních dveří a kapoty, kudy při frekvencích blízkých rezonanci protékají proudy z daného objemového prvku do zbytku karoserie vozidla.
- 3) Bylo zjištěno, že proudy tekoucí po modulově vkládaných komponentech mají relativně malý vliv na celkové rozložení proudů v karoserii. Žádný z nich nepředstavuje zásadní paralelní či jedinou vodivou cestu, po které by se proudy šířily při zanedbání jiné části vozidla. Klíčový je zejména vliv na posun rezonančních kmitočtů.
- 4) Při popisu rozložení proudů přímo na modulových komponentech bylo zjištěno, že zejména po výztuze palubní desky se šíří v rezonanci proudy, které mohou ovlivnit kabelové svazky na nich umístěné.
- 5) Pro realistický popis vnitřní dutiny karoserie je nezbytné, aby v celkovém modelu byly pro předcertifikační simulaci použity konstrukce sedadel a výztuha palubní desky. Bez těchto elementů nemůžeme dosáhnout věrného popisu rozložení pole v těchto místech.
- 6) Pro značnou hrubost modelu a nízkou vypovídací schopnost takové simulace navrhujeme v předcertifikační simulaci zanedbat kompletně výbavu motorového prostoru.

Kapitola 2.5

V kapitole byl diskutován vliv umístění zdroje testovacího pole na rozložení elektrického pole uvnitř karoserie zkoumaného vozu. Na základě analýzy vazby vnějšího a vnitřního prostředí – různé tvary a velikosti vazebních otvorů (oken vozidla), dominantních rezonančních módů a nesymetrií vnitřní výbavy vozidla můžeme učinit následující doporučení.

Nejvyšších intenzit elektrického pole bylo dosaženo v případě expozice vozidla z čela vertikálně polarizovanou rovinnou vlnou. Navrhujeme ji proto jako primární zkušební konfiguraci. Díky dominantním módům, které se v této konfiguraci a uvažovaném frekvenčním rozsahu uplatňují, nezáleží na množství a velikosti vazebních otvorů v bocích karoserie (boční okna). Vnik vlny do vozidla rovněž podporuje dostatečně velký vazební otvor tvořený čelním oknem, který díky svým rozměrům umožní vznik i nejnižších teoreticky možných nejsilnějších rezonančních módů (např. TE₁₀₁). Rovněž se výrazně uplatňuje nárůst intenzity elektrického pole ve všech klíčových měřených bodech, nejvýrazněji na sloupku řízení a v místě čelního panelu systému infotainmentu.

Jako druhou zkušební pozici navrhujeme zkoušku zprava, při horizontální polarizaci. Expozice vozidla z bočního směru dává vzniknout odlišným rezonančním módům dutiny a tím exponuje odlišné části vozidla než při zkoušce z čela. Na základě

jednoduššího vniku vlny do vozidla z pravé strany (kde vlna nedopadá ihned po průchodu vazebním otvorem na sloupek řízení) může dojít ke vzniku vyšších úrovní pole v rezonanci a tím k důkladnější zkoušce vozidla⁹.

Velmi slibnou alternativou ke všem testovacím pozicím kolmým na osu z vozidla se ukazuje zkouška vozidla vertikálně polarizovanou vlnou shora. Bylo ukázáno, že až do frekvence 100 MHz je expozice bodů TP4, TP3 a TP1 (tedy bodů nacházejících se na okraji vnitřní dutiny vozidla) téměř totožná se zkouškou z čela při vertikální polarizaci. Můžeme proto tuto pozici doporučit pro zkoušky do 100 MHz, pokud to konstrukční řešení umožní.

Kapitola 2.6

V poslední kapitole jsou shrnuty jednotlivé poznatky z předchozích kapitol a stanovena doporučení pro realizaci předcertifikačních simulací elektromagnetické odolnosti na vozidlech. Na základě těchto doporučení je provedena a diskutována ukázková numerická simulace kompletního vozidla.

Výsledky uvedené v kapitole 2.6.2 demonstrují použitelnost daných doporučení. Po nezbytných pracích na numerickém modelu a nastavení simulace dle stanovených zásad byla zjištěna frekvenční závislost intenzity elektrického pole při expozici vertikálně i horizontálně polarizovanou vlnou v definovaných měřicích osách. Byly nalezeny kritické frekvence: 63, 71, 120 MHz pro vertikální polarizaci a 63, 71, 147 a 179 MHz pro polarizaci horizontální elektrického pole.

Výsledky získané v kapitole 2.6.2 budou dále konfrontovány s předcertifikačními a certifikačními měřeními, aby mohla být jednoznačně potvrzena správnost doporučení daných pro předcertifikační numerické simulace.

⁹ Při této úvaze bereme v potaz vozidlo s levostranným řízením. V případě zkoušky na vozidle s pravostranným řízením platí analogické doporučení, tedy zkouška z leva.

3. PŘEDCERTIFIKAČNÍ MĚŘENÍ

V předchozí kapitole byly diskutovány možnosti provádění předcertifikačních testů vozidel pomocí numerických simulací. Z kapitoly vyplynulo, že při vhodné kombinaci dobře zvolených parametrů výpočetní metody, kvalitně vytvořeném numerickém modelu vozidla, respektujícím tvar karoserie a jejích jednotlivých částí, vhodné volbě a pozici vnějšího zkušebního pole, můžeme dosáhnout velmi uspokojivých výsledků, které mohou do určité míry nahradit reálné zkoušky odolnosti celých vozidel. Abychom však tuto metodiku doplnili a následně ověřili, provedeme sérii předcertifikačních a certifikačních měření. Tato měření budeme realizovat nejprve v omezených podmínkách pracoviště, které není pro zkoušky odolnosti celých vozidel zcela vybaveno – budeme tedy provádět testy předcertifikační, následně je však doplníme v kapitole 4 o měření na certifikovaném pracovišti, splňujícím veškeré požadavky kladené na certifikaci (homologaci) vozidla z pohledu EMC.

3.1. PŘEDMĚT ZKOUŠKY

Předcertifikační měření budeme provádět s co nejvíce podobnými parametry jako při numerické simulaci. K tomu budeme využívat dva základní typy testovacích vozů. V obou případech se jedná o sériové vozy Škoda Octavia 3. generace v provedení limuzína, ovšem s diametrálně odlišným vystrojením vozidla nevodivými částmi, řídicími jednotkami, skly a kabelovými svazky. První vůz je tvořen pouze holou karosérií vozidla (kapitola 3.1.1), druhým je kompletní vozidlo v sériovém stavu (kapitola 3.1.2).

3.1.1. HOLÁ KAROSERIE VOZIDLA

Pro účely ověření výsledků numerických simulací byl sériový vůz ve smyslu doporučení z kapitoly 2.6.1 zcela zbaven plastových, látkových a skleněných dílů, byly též odstraněny všechny řídicí jednotky a kabelové svazky. Vyjmut byl rovněž kompletní agregát, nápravy a výfukové ústrojí. Vůz je tak tvořen pouze kovovým skeletem karoserie, výztuhou palubní desky s volantem a sedačkami (Obr. 74).



Obr. 74 – Odstrojená karoserie vozu Škoda Octavia.

Tyto parametry zcela korespondují s nejvíce perspektivním numerickým modelem, popisovaným v kapitole 2.4. Aby byla umožněna manipulace s vozem, který stejně jako numerický model nemá vlastní kola, je vůz umístěn na nosiči karoserií s gumovými koly. Vozík nemá na chování vnitřní rezonanční dutiny vozidla vliv a rovněž zajišťuje stejné podmínky z hlediska připojení vozu k zemní rovině. Detaily technického řešení umístění karoserie na vozíku je možno vidět na obrázku (Obr. 75).



Obr. 75 - Umístění karoserie vozidla na vozíku s nevodivými koly.

Při demontáži vozidla určeného pro ověření výsledků numerických simulací byl kladen důraz na citlivost takového zásahu z pohledu zachování komplexní vodivosti karoserie. Jednotlivé díly karoserie, které nejsou do celku pevně připojeny bodovými svary, jsou totiž v sériovém stavu dodatečným způsobem připojeny k zemnímu potenciálu celého vozidla. Jedná se zejména o boční dveře vozidla a víko zavazadelníku (5. dveře). Boční dveře vozidla jsou dodatečně připojeny do zemního bodu (tukru) v B sloupku, dveře zavazadelníku pak dle výbavy vozidla (rozhodující je zejména přítomnost řídicích jednotek ve víku - například parkovací kamera) jednoduše, nebo dvojitě ve sloupku C. Při dodržení podmínky absolutního vyjmutí kabelových svazků by došlo k situaci, že tyto montované prvky by nebyly dostatečným způsobem vodivě připojeny ke karoserii, čímž by se mohlo chování celku karoserie vůči rezonančním fenoménům značně změnit. Samotný kontakt přes kovové panty, zajišťující přenos mechanických sil, je dlouhodobě považován za nedostatečný, zejména pro svoji časovou nestálost a nespolehlivost v odlišných klimatických a zátěžových podmínkách.

Proto byly při demontáži zachovány zemní vodiče sériového průřezu, které zajistí odpovídající připojení montovaných dílů do zbytku karoserie. Tento stav ostatně odpovídá i numerickému modelu, kde je tento kostřící prvek simulován jedním segmentem trojúhelníkové sítě.

Podobně jako v případě montovaných prvků vnějších částí karoserie bylo nutno postupovat i v případě vnitřních kovových výztuh vozidla. Nosná část palubní desky není běžně vybavena dodatečným připojením k zemnímu potenciálu, neboť se nejedná o lakovaný díl, u kterého je vodivý kontakt se zbytkem karoserie zajištěn trnem a šroubovým spojem s definovaným utahovacím momentem. Navíc se během jeho živostnosti nepředpokládá pohyb vůči zbytku karoserie, na rozdíl od dveří či víka zavazadelníku. Vzhled výztuhy palubní desky a její umístění v karoserii vozidla je možno vidět na obrázku (Obr. 76).



Obr. 76 - Detail výztuhy palubní desky.

Konstrukce sedadel řidiče a spolujezdce je z pohledu zajištění převodu zemního potenciálu ošetřena méně robustním způsobem. Předpokládá se zde spojení pouze pomocí šroubových spojů. Vzhledem k vysokému utahovacímu momentu, průměru šroubových spojů a stálosti tohoto spojení s vyloučeným pohybem, můžeme spojení považovat za dostatečné.

Sedadla nebyla na rozdíl od jiných prvků nijak odstrojována, neboť by došlo k porušení pružných drátěných výplní umístěných v pění sedáků, které mohou mít zejména na vyšších frekvencích vliv na rozložení pole v blízkosti sedadel. Způsob umístění sedadel v karoserii můžeme vidět na obrázku (Obr. 77). Pozice sedadel při zkoušce bude ve střední poloze jejich vodorovné i svislé dráhy, stejně jako při numerické simulaci.

Posledním prvkem, který vstupuje do problematiky, je kapota motorového prostoru. Kapota je ke karoserii připojena pomocí dvojice pantů, které zajišťují dostatečnou mechanickou robustnost spojení, ale již menší spolehlivost z hlediska přenosu proudů. Kapota není běžně přídatným způsobem připojena ke zbytku karoserie, ale s přihlédnutím na předcházející demontáž všech prvků vozidla a jejich následné opětovné



Obr. 77 - Umístění kompletních sedadel do karoserie vozidla.

složení je nutné ji pro účely měření dodatečně zemním páskem ke zbytku karoserie připojit. Zemní pásek o průřezu 4 mm^2 byl umístěn na šroubové spoje pantů na straně karoserie i kapoty a překrnuje tak nejkratší možnou délkou pant na pravé straně vozidla.

3.1.2. **KOMPLETNÍ VŮZ**

Aby bylo možno posoudit odlišnosti rozložení intenzity elektrického pole v holé karoserii vozu a ve voze kompletním, včetně všech fenoménů s tím přímo i nepřímo souvisejících, jsme jako druhý testovací model použili běžný sériový automobil. Tento vůz nebyl pro účely zkoušky nijak modifikován, byla pouze posouzena shoda tvaru karoserie v závislosti na stupni výbavy automobilu. V případě vybavení automobilu některými specifickými komponenty by mohlo být rozložení pole v karoserii odlišné a model by nebyl pro účely srovnání použitelný. Jedná se zejména o střešní okno, resp. panoramatickou střechu, která tvoří v objemu karoserie značný otvor a tím zásadně mění kvalitu rezonanční dutiny a posouvá její přirozené módy rezonance. Naopak vůz vybavený panoramatickou střechou je mnohem více náchylný na vniknutí vnějšího pole do vnitřního prostoru, čímž činí výsledky neporovnatelné s numerickými simulacemi, kde není panoramatická střecha uvažována.

3.2. ASPEKTY REALIZACE PŘEDCERTIFIKAČNÍHO MĚŘENÍ

Metodika předcertifikačních měření, kterou budeme v této kapitole rozebírat, vychází principiálně z homologačního předpisu ECE R10.5 [20] zahrnujícího požadavky na homologaci kolových vozidel z pohledu EMC, standardu ISO 11452-2 [17] pojednávajícího o zkouškách odolnosti kolových vozidel vůči vyzářeným úzkopásmovým elektromagnetickým signálům ve stíněných komorách a ISO 11452-1 [16] definujícím obecné požadavky na provádění zkoušek odolnosti vůči vyzářeným úzkopásmovým elektromagnetickým signálům. Ve všech částech následujícího textu budou popsány a zdůvodněny shody a rozdíly vůči výše uvedeným standardům tak, aby bylo možno dosáhnout jejich splnění při certifikační zkoušce. Zároveň ovšem předpokládáme, že této certifikační zkoušce předcházela zde popsaná zkouška předcertifikační, prováděná pomocí omezených technických, finančních a časových prostředků. Cílem této kapitoly je tedy přiblížit se co nejvíce s dostupnou technikou a omezenými prostředky podmínkám homologační (certifikační) zkoušky. To vše při vědomém, avšak dobře popsaném a z hlediska rizika neshody uváženém nesplnění všech požadavků normou na zkoušku kladených.

3.2.1. MĚŘICÍ PRACOVÍŠTĚ

Norma ISO 11452-2 [17] předepisuje, že zkoušky odolnosti celých vozidel je nutno provádět ve stíněných prostorách. Účelem těchto prostor je izolace testovacího prostředí od prostředí okolního a také snížení odrazu testovacího signálu od stěn tohoto zařízení vhodnými absorpčními materiály o alespoň 10 dB, při porovnání dopadající a odražené vlny. Zařízení jako celek má nahradit test vozidla ve volném poli bez vnějších vlivů a rovněž zajistit, aby zkouška neovlivnila prostředí vnější. Z pohledu konvenční EMC se tedy jedná o částečně bezodrazovou stíněnou komoru.

Výstavba či pronájem stíněné komory je však extrémně finančně náročnou záležitostí. Proto pro účely nezbytné izolace vnitřního prostředí při zkoušce odolnosti navrhujeme použití stíněného stanu, s vhodnou stínicí účinností, konstruovaného pro účely předcertifikačních zkoušek.

Stíněný stan je tvořen jednou, či více vrstvami vysoce vodivé látky, utkané obvykle z vláken tvořených slitinou mědi a niklu (RIPStop CuNi®). Látka je často vyztužena textilními vlákny pro zvýšení pevnosti takového řešení. Konstrukce stanu je obvykle skládací, často řešena trubkami z uhlíkových vláken. Vzhled stíněného stanu používaného pro předcertifikační zkoušky je možno vidět na obrázku (Obr. 79).

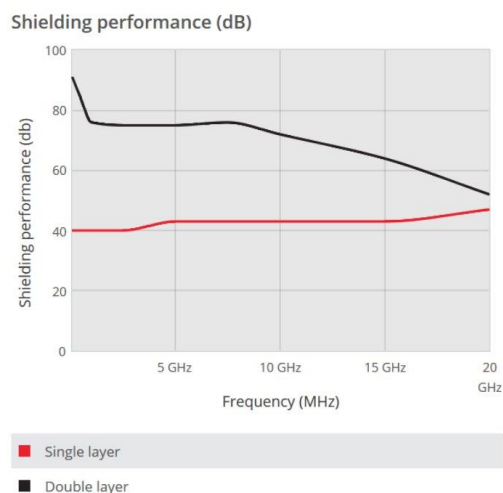
Dle [90] a [91] dosahují stíněné stany vysoké stínicí účinnosti (až 90 dB v závislosti na počtu vrstev stínicího materiálu, viz obrázek (Obr. 78)), maximální mobility (předcertifikační laboratoř může být vystavěna v podstatě kdekoliv) při ceně odpovídající 5 – 10 % ceny stíněné komory. Rovněž disponují množstvím příslušenství (průchodky pro kabelové vstupy, vstupní filtry, ventilace, osvětlení), které z nich činí plně funkční pracoviště na předcertifikační zkoušky elektromagnetické kompatibility.

Při používání tohoto měřicího místa ovšem vyvstávají otázky zejména z hlediska možnosti potlačení odražených signálů od stěn z extrémně vodivé látky, způsobu řešení zemní roviny a rovněž životnosti takového řešení. Odrazy od vnitřních stěn stanu je do určité míry možno eliminovat pomocí speciálních pyramidálních absorberů, které je možno přichytit ke stěnám stanu a které jsou jeho volitelným příslušenstvím.

Zemní rovina je dle [90] konstruována na zátěž 400 kg/m^2 , tvoří ji mozaikově skládané dlaždice z recyklátu syceného vodivými materiály a je rovněž galvanicky připojena ke stěnám stanu. Výrobce deklaruje životnost materiálu stanu na 10 000 přehnutí látky, ovšem v praxi není dokázáno, je-li tento údaj pro dlouhodobou životnost dostačující, či nikoliv.

Vstupní dveře jsou řešeny rolováním materiálu a jejich zavírání pomocí vodivých zipů, nebo magnetů. Ventilace je podobně jako u stíněných komor řešena pomocí plástvových průchodů, vyrobených z vhodné skládané vodivé látky.

I přes nevýhody v podobě vlastních rezonancí dutiny a nejistých dlouhodobých vlastností, představuje stíněný stan jedinečné řešení pro předcertifikační zkoušky. Umožňuje totiž vytvoření nezbytného stíněného pracoviště s minimálními náklady oproti stíněné komoře při vysoké mobilitě a flexibilitě takového řešení.



Obr. 78 – Typický průběh stínící účinnosti stíněného stanu. Převzato z [91].



Obr. 79 – Stíněný stan pro účely předcertifikační zkoušky EMC. Převzato z [89].

3.2.2. TECHNICKÉ VYBAVENÍ PRO PŘEDCERTIFIKAČNÍ TESTY

Technické vybavení pro předcertifikační zkoušky elektromagnetické odolnosti se v podstatě své funkce neliší od vybavení pro zkoušky certifikační. Možnost redukce nároků tak spatřujeme v použití techniky s nižšími frekvenčními rozsahy, nižšími výkony a minimalizací počtu vysílacích antén. Pro předcertifikační testy lze doporučit následující techniku:

Vysokofrekvenční generátor pokrývající kmitočtové pásmo 30 MHz – 1GHz s možností amplitudové modulace sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 %. Pro předcertifikační zkoušky vozidel dostačuje generátor s takto nízkým frekvenčním rozsahem, neboť jak bylo zmíněno, nejkritičtější projevy vnějších polí se projevují obvykle do 220 MHz, kdy vlastní rezonance karoserie dosahuje nejvyšších intenzit. Výstup generátoru může být opatřen filtrem typu dolní, příp. pásmová propust pro potlačení vyšších harmonických složek generovaného signálu. Absolutní frekvenční i výkonová stabilita není pro účely předcertifikační zkoušky odolnosti klíčová. Doporučujeme proto použití moderních low-cost RF generátorů připojených do USB portu, například [92], [93]. Uvedené generátory pracují na principu frekvenční syntézy (PLL). Jejich výhodou je velmi nízká cena, jednoduchost ovládání a odpovídající frekvenční rozsah.

Širokopásmový výkonový zesilovač k dosažení patřičného výkonu zkušebního signálu, a to jak nemodulovaného, tak i modulovaného. Tento prvek je finančně nejnáročnější částí předcertifikační sestavy. Musíme uvažovat, že potřebný budicí výkon je součtem několika veličin. Ze známého vztahu (31)

$$P = 20 \cdot \log E + 20 \cdot \log r - 20 \cdot \log f + AF_{VA} + 15, \quad (31)$$

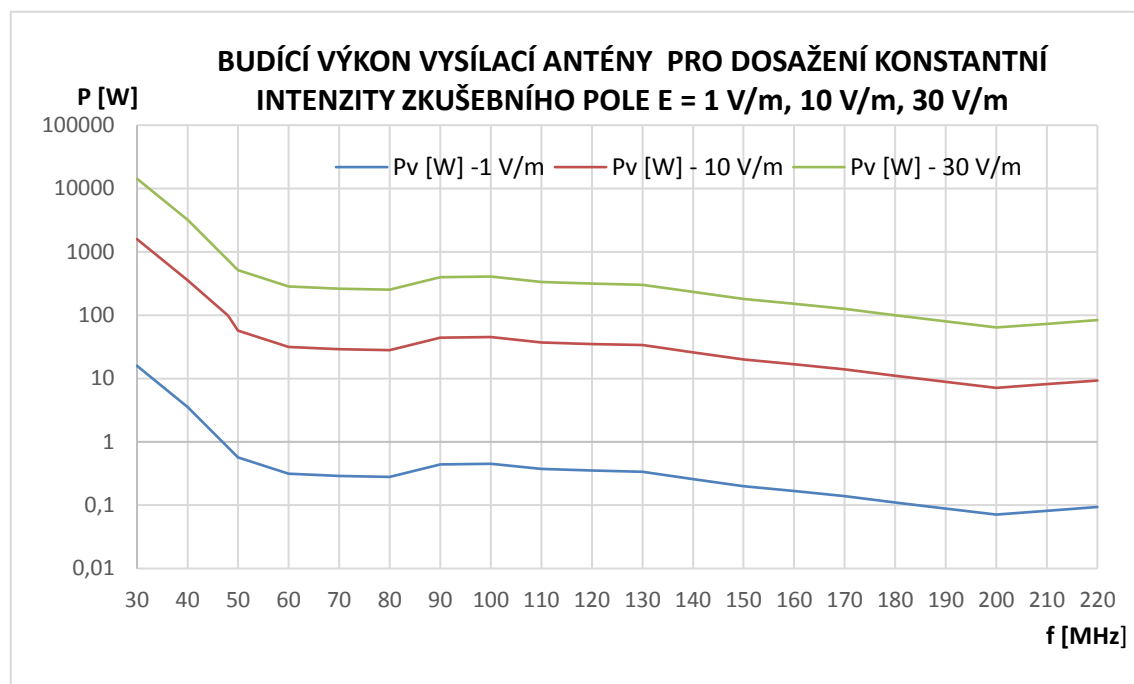
kde P [dBW] je budicí výkon antény, E [V/m] je požadovaná intenzita elektrického pole, r [m] vzdálenost antény, AF_{VA} anténní faktor vysílací antény, vyplývá, že výkon nutný k dosažení požadované intenzity roste se vzdáleností antény od bodu, ve kterém tuto intenzitu požadujeme, a klesá s frekvencí, na které chceme tuto intenzitu dosáhnout. Je tedy zřejmé, že volba zkušební intenzity pole značným způsobem ovlivňuje výkon koncového zesilovače a tím i jeho cenu.

Tato závislost je ilustrována na obrázku (Obr. 80). Z toho jasně vyplývá, že při vzdálenosti fázového středu antény od osy vozidla $r = 3$ m, uvažovaném frekvenčním rozsahu 30 – 220 MHz, reálném anténním faktoru použité antény CBL 6112D a třech uvažovaných zkušebních intenzitách pole (1, 10, 30 V/m) jsou požadavky na dodaný výkon velmi odlišné. Ze závislosti rovněž vyplývá, že je v této konfiguraci náročné dosahovat vysokých intenzit pole zejména na nízkých frekvencích. Je proto nezbytné zkušební intenzitu volit vhodným způsobem tak, aby bylo dosaženo kýženého efektu zkoušky a zároveň nebyl překročen maximální výkon zesilovače.

Navrhujeme proto pro předcertifikační zkoušky aplikovat následující postup. Ze známého frekvenčního rozsahu, vzdálenosti antény, jejího anténního faktoru a výkonu zesilovače určíme frekvenční závislost maximální dostupné intenzity zkušebního pole. Tuto hodnotu porovnáme s referenční hodnotou tak, aby uvažovaná intenzita elektrického pole byla dosažitelná v 90% frekvenčního pásma, přičemž 10 % frekvenčního pásma musí dostupná intenzita elektrického pole dosahovat alespoň 70 % uvažované hodnoty. Tento přístup využívá možnost definovanou v předpisu ECE 10.5 [20], který stanoví, že

zkouška musí proběhnout v 90 % frekvenčního pásma s plnou zkušební intenzitou a v 10 % pásma s intenzitou sníženou.

Tím v souladu s normou zanedbáme částečné poklesy intenzity elektrického pole a pro zbytek zkoušeného pásma máme k dispozici vyšší konstantní intenzitu než v případě, kdy by bylo pro celé pásmo kvůli nedostatku výkonu (například na okrajích pásma) nutno snížit zkušební intenzitu v celém zkoušeném rozsahu.



Obr. 80 - Budící výkon antény nutný pro dosažení konstantní intenzity zkušebního pole v uvažovaném frekvenčním rozsahu.

Jako vysílací směrovou anténu lze použít všechny antény používané k měření rušivých signálů, ovšem s přihlédnutím k jejich výkonové zatížitelnosti. Pro účely předcertifikačních zkoušek doporučujeme použití antény typu BiLog z důvodu širokopásmovosti (námi používaný typ CBL 6112D je určen pro frekvence 30 MHz – 2 GHz), odpovídajících směrových charakteristik (potlačené boční laloky), vysoké zatížitelnosti (zde 300 W), dobrého zisku (typicky 5 dBi) a nízké pořizovací ceny. Tato anténa dle dosavadních poznatků zcela spolehlivě pokryje veškeré požadavky předcertifikačních testů elektromagnetické odolnosti. Více informací o anténách typu BiLog lze získat v [94], [95].

Měřiče dopředného a odraženého výkonu, detekující výkon dodávaný zesilovačem do zátěže (antény) a výkon ze zátěže odražený. Vzhledem ke specifikům použité měřicí metody je vhodné použití průměrujícího měřiče výkonu. Nejdůležitějším parametrem je odpovídající frekvenční rozsah, dostatečný rozsah měřeného výkonu a jednoduchost připojení k ostatním periferiím.

Dle použité měřicí metody měřič intenzity elektrického pole. Doporučujeme použití isotropní sondy co nejmenších rozměrů z důvodu možnosti ovlivnění měřeného pole s možností komunikace po optické lince. Více informací poskytne např. literatura [96], [97], [98], [99].

Zapojení testovací sestavy musí vždy vycházet ze zvolené měřicí metody a dispozic každého pracoviště. Testovací sestava, použitá pro experimentální ověření zde navrhovaných metod, se skládá z následujících přístrojů:

- 1) **Generátor R&S SMC100A** (9kHz – 1GHz, max. výstupní výkon +17 dBm, AM modulace)
- 2) **Zesilovač PRANA DR 220** (10 kHz – 400 MHz, max. výstupní výkon 220 W CW)
- 3) **Anténa Teseq CBL 6112D** (BiLog, 30 MHz – 2 GHz, max. zatížitelnost 300 W CW, typický zisk 6 dBi)
- 4) **Měřiče výkonu R&S NRP-Z91** (9 kHz – 6 GHz, rozsah měřených výkonů - 67 dBm až 23 dBm, průměrující detektor)
- 5) **Sonda intenzity elektrického pole Narda NBM-550** (Sonda EF 0392, E-Field, 100 kHz – 3 GHz, Isotropní)

3.2.3. ZKUŠEBNÍ METODA

Správná volba testovací metody je stěžejní částí této kapitoly. Metodika by měla vycházet ze známých standardů, které definují požadavky na certifikační zkoušky, ale zároveň musí být dostatečně jednoduchá, technicky i finančně nenáročná a proveditelná i na pracovištích, které nejsou primárně pro zkoušky odolnosti vůči vnějším polím zavedeny. Budeme předpokládat, že pracoviště, které chce zkoušky odolnosti provádět, disponuje určitou formou stíněného prostoru, zajištěného buď stíněnou komorou, nebo stíněným testovacím stanem (kapitola 3.2.1) a alespoň základním technickým vybavením (kapitola 3.2.2).

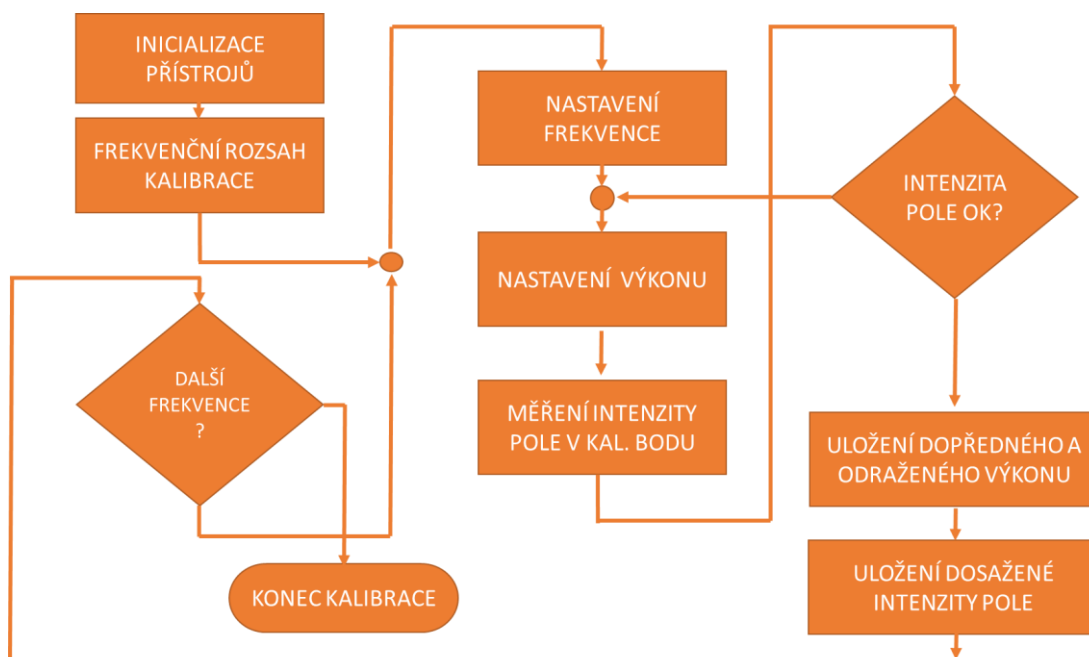
Při předcertifikační zkoušce odolnosti, respektive měření rozložení intenzity elektrického pole v karoserii, je možno vyjít ze dvou základních metod zajišťujících nastavení správné úrovně testovacího pole. Jedná se o následující metody:

a) Substituční metoda

Testovací metoda založená na dvoufázové zkoušce, přičemž v první části zkoušky dochází ke kalibraci měřicí aparatury na cílovou intenzitu elektrického pole v referenčním bodě a v druhé části zkoušky k vlastnímu ověření DUT na základě parametrů získaných při kalibraci.

Postup testu je následující:

- 1) Provedeme kalibraci pracoviště bez přítomnosti DUT a zaznamenáme dopředný výkon na vysílací anténu, odražený výkon a intenzitu pole v daném frekvenčním rozsahu. Princip kalibračního měření je na obrázku (Obr. 81).
- 2) Realizujeme test DUT na základě známých hodnot (zejména dopředného výkonu) zjištěných při kalibraci.



Obr. 81 – Zjednodušený diagram postupu kalibračního měření u substituční metody.

V praxi se test provede tak, že do referenčního bodu vozidla umístíme sondu elektrického pole (o kalibraci a uniformitě pole pojednává text této kapitoly dále), připravíme veškerá pomocná zařízení (stožár s anténou, sondy elektrického pole, vysílací technika) a následně provádíme kalibraci zkušebního pole na určenou hodnotu (např. 30 V/m, odpovídající zkušební intenzitě pole při certifikačních zkouškách vozidel s definovaným frekvenčním krokem). Při této kalibraci zaznamenáváme dopředný a odražený výkon k anténě, resp. z antény, a rovněž dosaženou intenzitu elektrického pole ve volném prostoru.

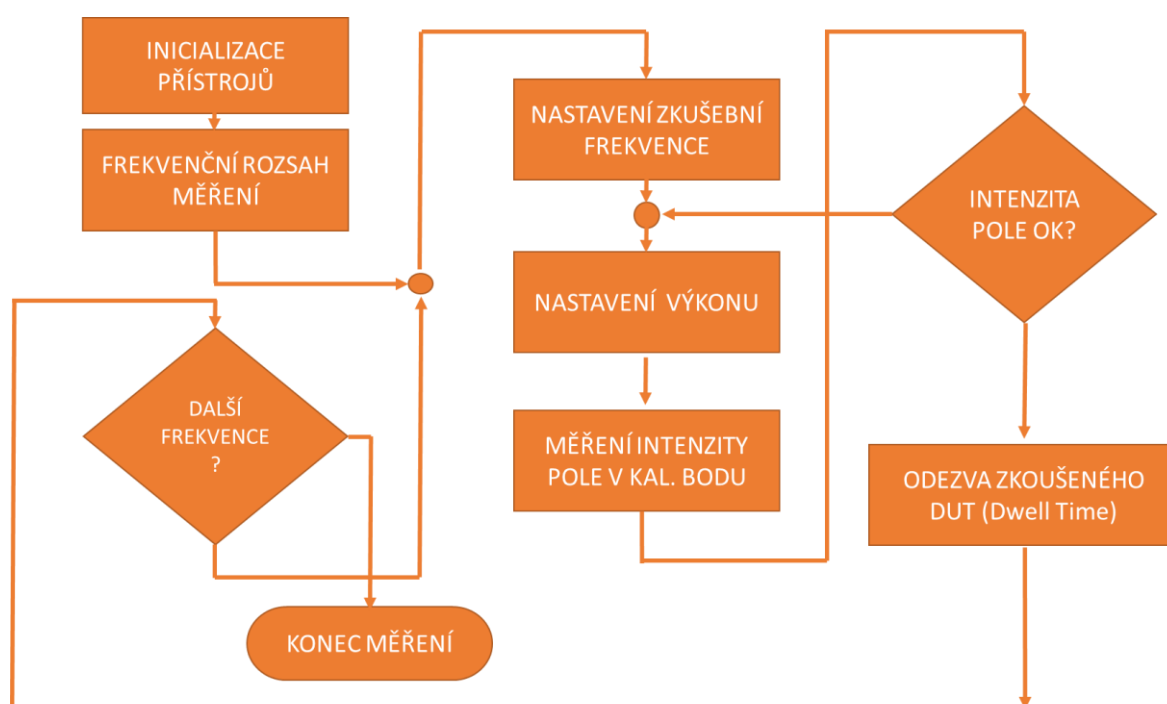
Použití metody vyžaduje relativně sofistikovaný způsob řízení, ideálně automatický obslužný SW. Ten zaznamenává v první části měření potřebné měřené hodnoty dopředného výkonu nutné k dosažení požadované intenzity pole a následně při zkoušce s vozidlem zajistí jejich nastavení na vysílací technice. Zároveň může zajistit kompletní ochranu vysílací techniky před nadlimitním odraženým výkonem, případně překročení maximálního zesílení koncového zesilovače. Sofistikovanost takového SW pak velmi záleží na tom, jestli se jedná o komerční produkt za tímto účelem přímo vyvinutý, nebo vlastní aplikační rozhraní.

Z praktického hlediska je tato metoda pro použití v automobilovém průmyslu velmi efektivní, neboť provedeme pouze jedinou kalibraci měřicího pracoviště a následně můžeme až do doby uplynutí platnosti kalibrace (typicky 1 týden) provádět zkoušky na různých (srovnatelných) typech DUT. Nevýhodou metody je nepřehlédnutí k fenoménům, které mohou během zkoušky vznikat. Jedná se zejména o vícecestné šíření způsobené odrazy a také rezonance vzniklé ve vnitřních dutinách automobilu. Může tak velmi jednoduše nastat situace (technická praxe pouze potvrzuje toto chování), kdy je díl ve vozidle vystaven mnohem vyšší intenzitě zkušebního pole, než které je pro zkoušku zvoleno a hlavně než pro které byl díl dodavatelem konstruován. Tato situace následně vede k diskuzím, zdali díl skutečně nevyhověl dané zkoušce, nebo je použitá zkušební metodika nedostatečně průkazná. Situaci lze ovšem vyřešit správným nastavením požadavků na odolnost kritických dílů vůči vnějším polím, která již respektuje toto očekávané rezonanční chování karoserie a vznik lokálních maxim. Tento postup ještě více

zvyšuje poptávku po relevantních předcertifikačních testech, prováděných zejména pomocí numerických simulací v rané části vývoje automobilu, kdy je možno odlišné požadavky na vývoj dílu se zvýšenou odolností vůči vnějším polím ještě požadovat.

b) Metoda nastavení výkonu v uzavřené smyčce

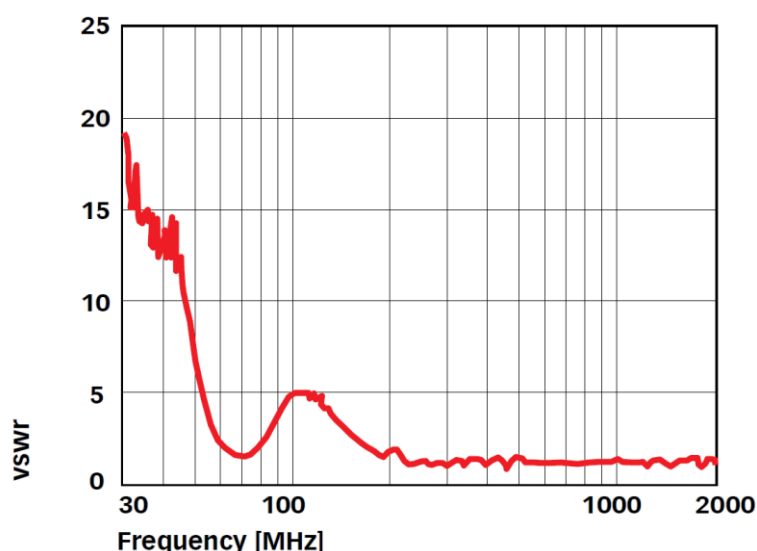
Základní princip této metody spočívá v neustálém měření klíčových veličin během zkoušky. Těmito veličinami jsou intenzita elektrického pole v místě referenčního bodu, dopředný a odražený výkon. Díky tomu jsou neustále k dispozici informace o tom, zdali je úroveň testovacího pole v zadaném limitu. Můžeme tak pružně reagovat na změny (dané například frekvenční závislostí činitele odrazu vysílací antény) a nastavovat úroveň testovacího signálu na generátoru. Princip metody je zjednodušeně zobrazen na obrázku (Obr. 82).



Obr. 82 – Diagram postupu zkoušky při použití metody nastavení výkonu v uzavřené smyčce.

Tato metoda z praktického hlediska skýtá riziko ve značné zdlouhavosti měření, neboť v reálné situaci jsou frekvenční závislosti VSWR širokopásmových antén používaných v EMC oblasti (zejména v oblasti do 1GHz) značně proměnné a obslužný program musí neustále dostavovat vysílací výkon generátoru, viz obrázek (Obr. 83).

Řešením takového problému by byla kalibrace dopředného výkonu nutného pro vysílací anténu před vlastním měřením, která by alespoň rámcově určila hodnoty nutného výkonu generátoru pro dosažení zkušební intenzity pole. Tato kalibrace je ovšem závislá na použití stále stejného DUT (v případě automobilového průmyslu například testování jedné rodiny vozů), neboť právě nastavení výkonu generátoru je silně závislé na zkoušeném předmětu. V případě zkoušek stále nových a z elektro-magnetického hlediska unikátních DUT, by byla tato navrhovaná kalibrace nepoužitelná.



Obr. 83 – Typická frekvenční závislost VSWR v EMC hojně používané BILOG antény CBL-6112D. Převzato z [94].

Pokud shrneme vlastnosti obou výše zmíněných metod, každá z nich najde své uplatnění při předcertifikačních zkouškách elektromagnetické odolnosti. Metoda nastavení výkonu v uzavřené smyčce je vhodná zejména na zkoušky, kdy je klíčovým parametrem vysílací výkon a nikoliv konstantní intenzita zkušebního pole. Takovými zkouškami jsou z pohledu automobilové EMC, zkoušky odolnosti vůči přenosným rádiovým zařízením, kdy je sledovaným parametrem právě dopředný výkon. Vzhledem k tomu, že zkouška probíhá nejčastěji v interiéru vozu (předmětem zkoušky jsou zejména kapsy, kam by mohla být radiostanice či mobilní telefon zákazníky uložen), je nemyslitelné, aby byl vnitřní prostor automobilu nejprve kalibrován na zkušební intenzitu elektrického pole a toto pole bylo při zkoušce následně nastavováno.

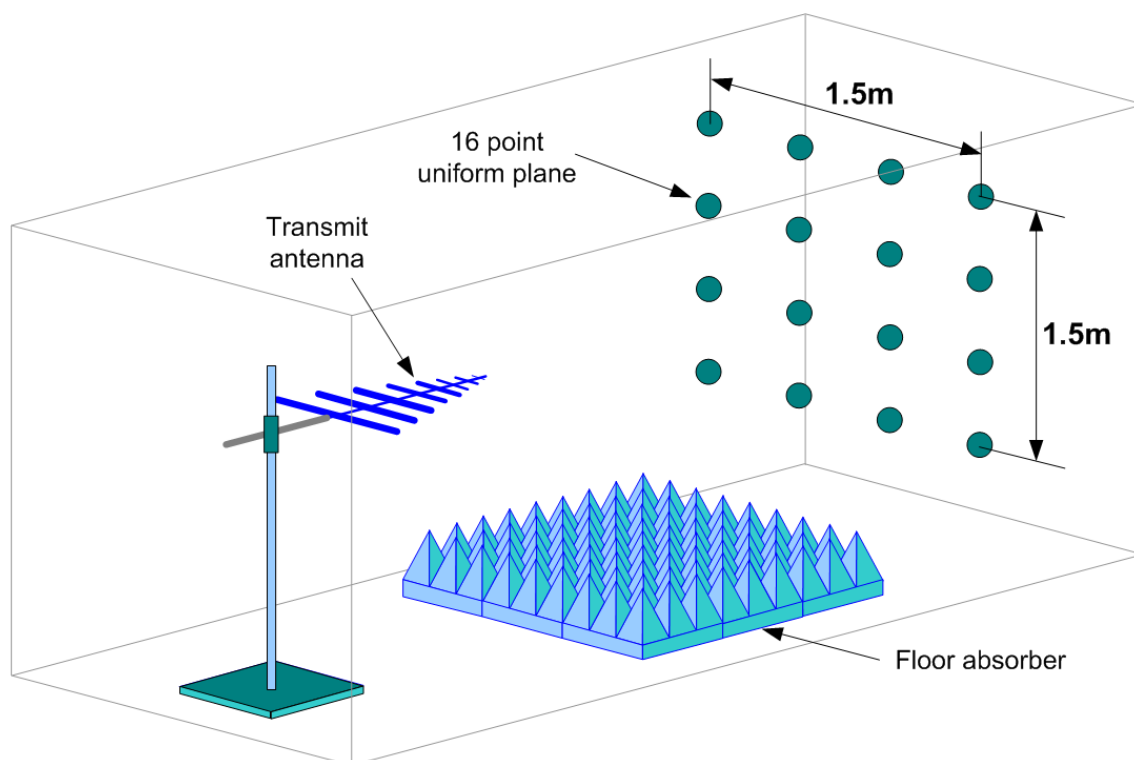
Při zkouškách celých vozů vůči vnějšímu elektromagnetickému poli je tato metoda ovšem nepraktická a velmi zdoluhavá. Proto doporučujeme pro předcertifikační zkoušky využívat výhradně metodu substituční, zajišťující dostatečnou jednoduchost a rychlost měření při dobré reprodukovatelnosti měření. Kalibraci pracoviště provedeme ve zkušebním intervalu dle metodiky navržené v kapitole 3.2.4 pouze jednou a následně již můžeme provádět téměř neomezený počet zkoušek DUT v různých konfiguracích.

3.2.4. KALIBRACE MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ

Velmi důležitým aspektem při certifikačních i předcertifikačních zkouškách za použití vnějšího pole je jeho definovatelnost a časová stálost. Musíme proto zajistit, aby zkušební pole bylo uniformní, časově neměnné a libovolně reprodukovatelné. Je proto nezbytné diskutovat metody kalibrace zkušebního pole, které bude možné při předcertifikačních zkouškách využít.

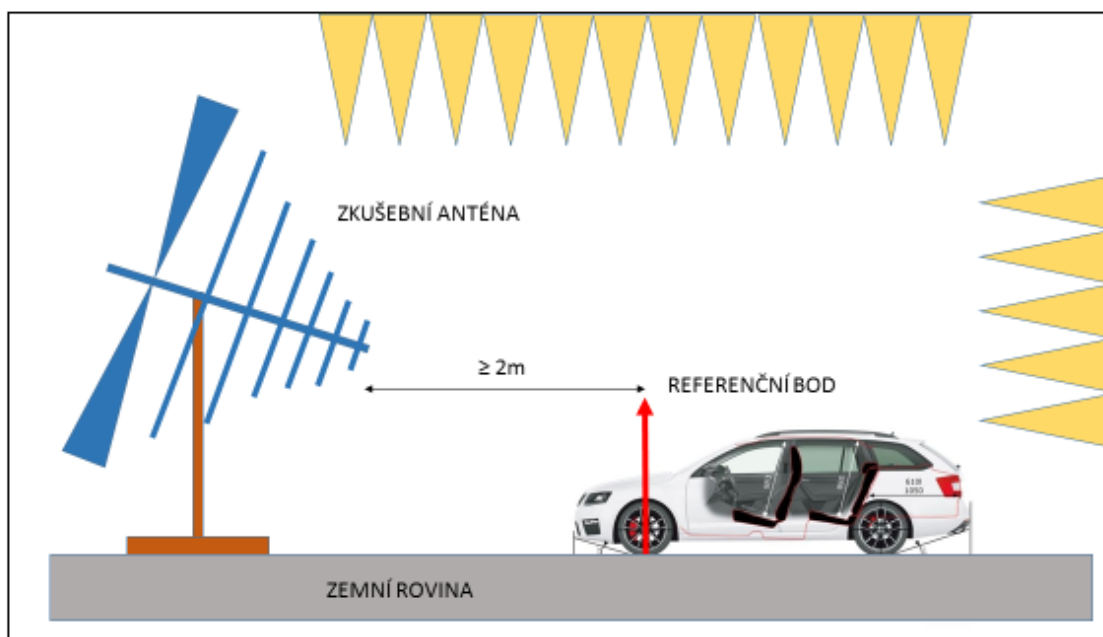
Při kalibraci zkušebního pole můžeme vycházet ze dvou základních standardů, které se problematice uniformity polí ve stíněných komorách věnují. V prvním případě se jedná o měření vycházející z ČSN EN 61000-4-3 [100], kdy je měřena uniformita pole v zóně nazývané uniform field area (UFA) v celkem 16 bodech ve vertikální rovině o rozměrech 1,5 x 1,5 m, viz obrázek (Obr. 84). Zkušební frekvenční rozsah je 26 MHz

– 40 GHz a pole se považuje za uniformní, pokud je v alespoň 12 bodech z 16 měřených rozdíl měřených hodnot menší než 6 dB. Spodní hrana testovacího pole se nachází 0,8 m nad zemní rovinou, ve vzdálenosti 3 m od fázového středu zkušební antény. Doporučená výška, ve které se testovací anténa nachází, není stanovena. Více o této metodě měření lze nalézt např. v [100] a [101].



Obr. 84 – Měření uniformity pole dle EN 61000-4-3. Převzato z [100].

Vzhledem k tomu, že zkoušky EMC v oblasti automobilového průmyslu hojně využívají normy založené na ISO standardech, zejména pak na ISO 11452[17], je nezbytné věnovat pozornost také ekvivalentní metodě kalibrace pole, kterou detailně popisuje homologační předpis ECE R 10.5 [20], který požadavky dané ISO 11452-2 [17] dále zpřesňuje. Dle tohoto předpisu se měření provádí v referenčním bodě ve vzdálenosti nejméně 2 metry od fázového středu bikónické zkušební antény (případně od posledního prvku logaritmicko-periodické antény, či horn antény) a výšce $1 \pm 0,05$ m nad zemní rovinou v podélné střední rovině vozidla. Intenzita pole je v referenčním bodě měřena pro horizontální, i vertikální polarizaci. Schematický popis této metody kalibrace lze nalézt na obrázku (Obr. 85). Dle standardu se v tomto bodě mají nacházet pro osobní vozidla celkem 4 snímače intenzity elektrického pole. Standard ovšem nijak nedefinuje výšku, ve které by se měly snímače nacházet, ani jejich vzájemnou vzdálenost. Je pouze definováno, že snímače se mají nacházet v jednotné vertikální rovině. Rovněž nejsou definovány povolené odchylky mezi jednotlivými snímači, na rozdíl od požadavků daných ČSN EN 61000-4-3 [100], kdy činí povolená odchylka maximálně 6 dB. Je rovněž vhodné jednoznačně stanovit bod na vozidle, který bychom mohli považovat za referenční při splnění podmínek daných[20].



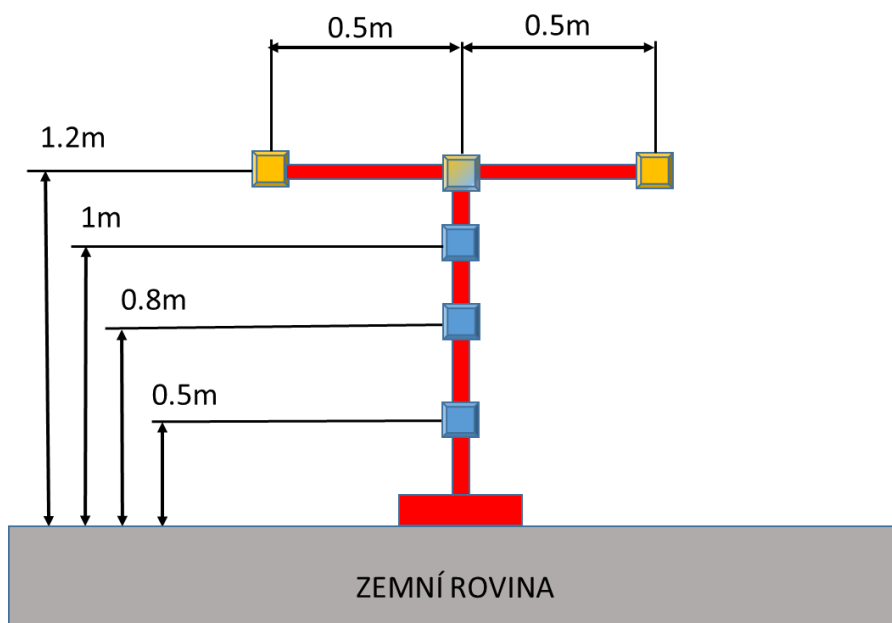
Obr. 85 – Schematické znázornění umístění referenčního bodu dle normy ISO 11452 pro osobní vozidla s maximální výškou střechy 2 m.

Z výše uvedeného je zřejmé, že existují definované postupy pro měření uniformity pole, nejsou ovšem dostatečně rozvinuty pro účely předcertifikačních testů v oblasti automobilové EMC. Je proto nezbytné zvolit a vyzkoušet takovou metodiku kalibrace pole, která bude dostatečně spolehlivá pro kvalitní posouzení uniformity zkušebního pole, ale zároveň bude časově i finančně nenáročná, neboť si neklade za cíl plnohodnotně nahradit kalibrační postupy definované výše zmíněnými standardy, ale být jejich dostupným ekvivalentem.

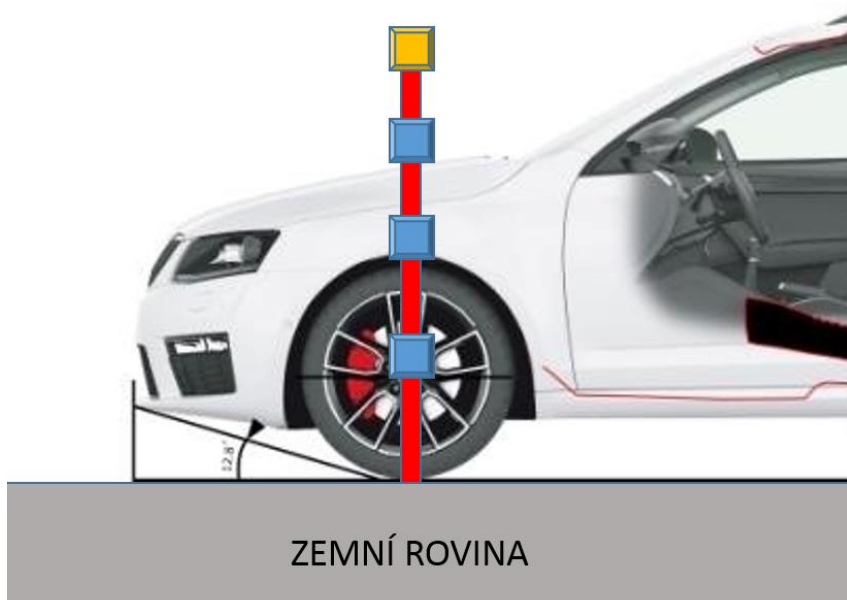
Na základě zkušeností získaných při měření uniformity polí v certifikované zkušebně EMC VW A.G. Wolfsburg, navrhujeme vlastní metodu měření využívající poznatků z [17], [20] a [100]. Jako referenční bod budeme bez rozdílu na maximální vzdálenost od fázového středu, respektive konce antény, používat osu předních kol vozidla (podmínka [20] na minimální vzdálenost 2 m je splněna díky dispozici zkušebního prostoru). Tato část vozu je zcela jasně definovatelná a zajištění uniformity v tomto místě zaručuje dobré výsledky při měření s vozidlem, neboť právě v blízkosti této pomyslné osy se nachází až 80 % veškerých elektronických řídicích jednotek.

Dále definujeme pozici jednotlivých sond pole. Navrhujeme umístit sondy do celkem 6 bodů ve dvou měřicích rovinách (vertikální a horizontální), přičemž pozice těchto bodů tvoří nejvýhodnější kombinaci mezi požadavky [100] a [20]. Jednotlivé body budou pro experiment umístěny následovně: vertikální rovina 0,5 m, 0,8 m, 1 m a 1,2 m nad zemní rovinou a horizontální rovina -0,5 m, 0 m, +0,5 m při konstantní výšce 1,2 m nad zemní rovinou. Tyto body budou sloužit k posouzení uniformity pole v kritických oblastech vozidla, ne tedy ve všech normou požadovaných bodech. Domníváme se totiž, že posouzení uniformity pole pouze v kritických oblastech vozidla je dostačující, neboť případný významný pokles intenzity pole by byl zachycen jedním z níže umístěných senzorů (0,5 m, 0,8 m), nebo by nebyl pro zkoušku vozidla významný.

Schematicky jsou navrhované měřicí body pro vertikální rovinu zobrazeny na obrázku (Obr. 86) modře, pro horizontální měřicí rovinu pak oranžově. Společný bod pro obě roviny pak modro-oranžově. Navrhujeme provádět měření uniformity pole stejným způsobem jak pro horizontální, tak i vertikální polarizaci zkušebního pole. Kalibraci budeme na základě principu substituční metody provádět bez přítomnosti vozidla.



Obr. 86 - Návrh umístění kalibračních sond – pohled z čela. Modře označeny sondy vertikální měřicí roviny, oranžově pak sondy horizontální měřicí roviny. Sonda společná pro obě roviny je pak označena modro-oranžově.

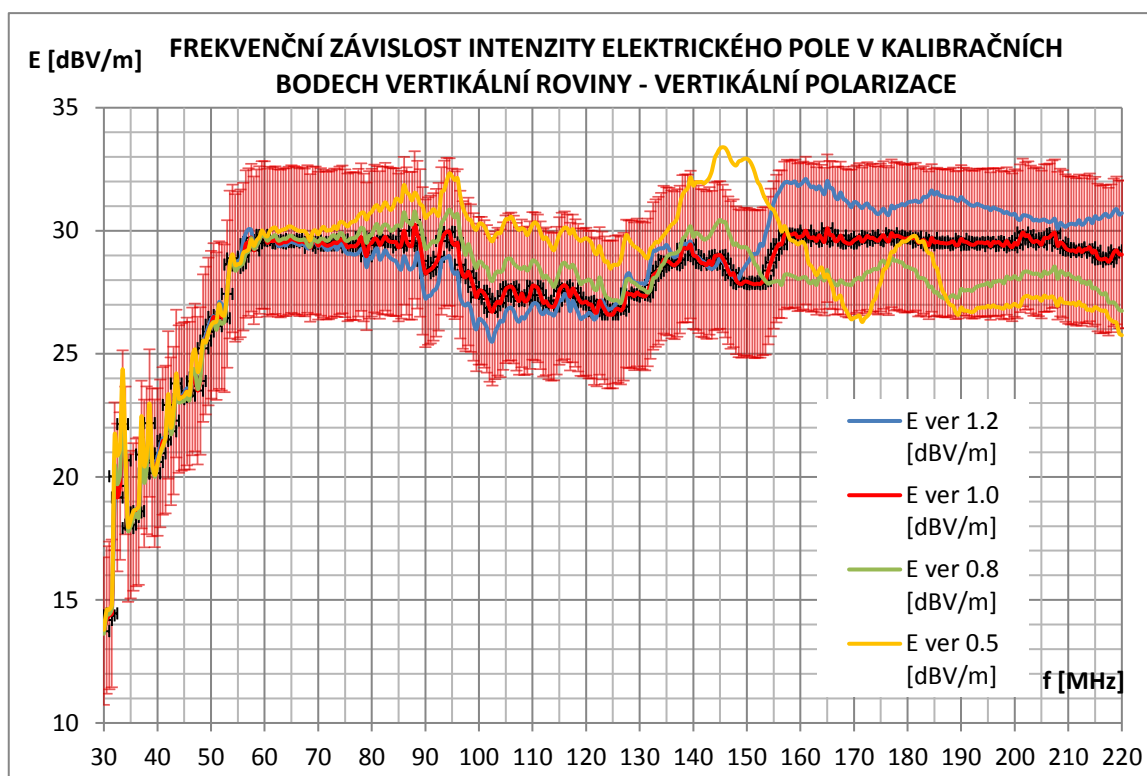


Obr. 87 – Detail umístění jednotlivých sond elektrického v referenčním bodě vozidla a vertikální rovině – pohled z boku. Jednotlivé sondy jsou umístěny ve výšce 0,5m, 0,8m, 1m a 1,2m nad zemní rovinou.

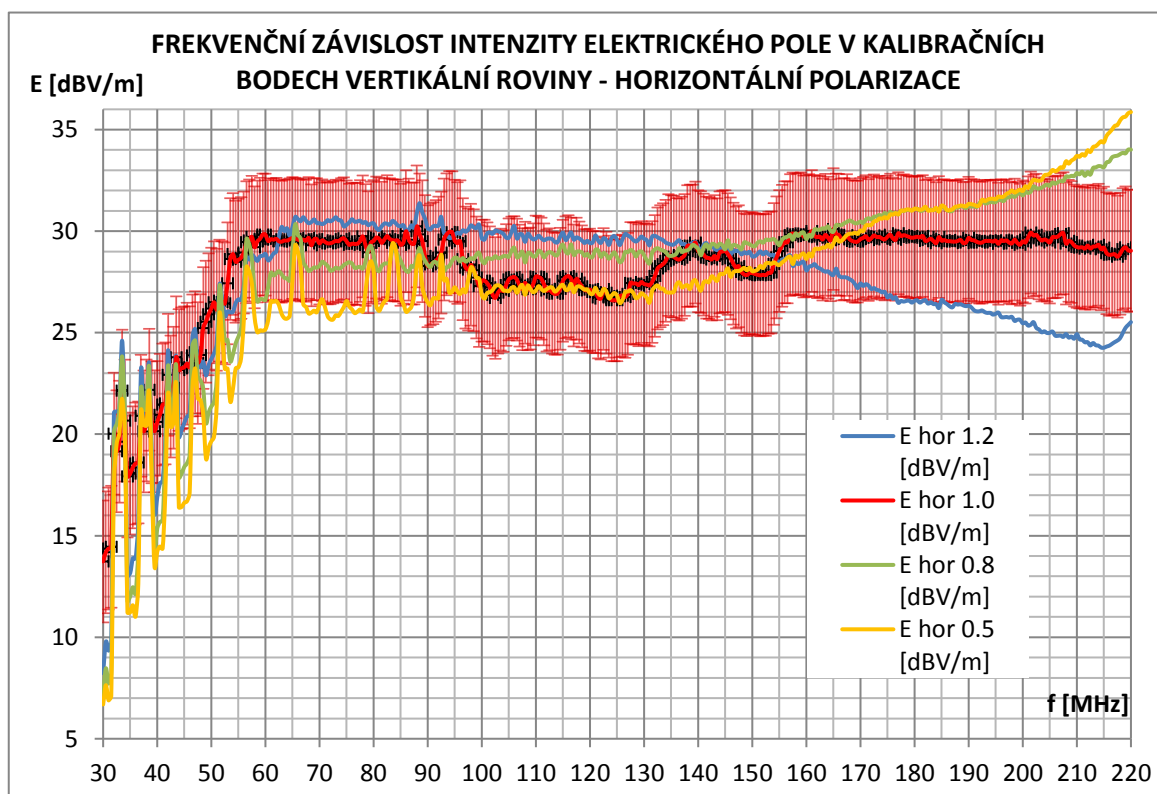
Pro ověření navrhované kalibrační metody provedeme experimentální měření homogenity pole pro uvažovanou zkušební intenzitu elektrického pole. Dle schématu na obrázcích (Obr. 86 a Obr. 87) umístíme postupně sondu elektrického pole do jednotlivých definovaných oblastí v obou osách a provedeme měření uniformity pole při hypoteticky konstantní intenzitě elektrického pole. Vzhledem k použité měřicí technice není možno dosáhnout ve zkoušeném frekvenčním rozsahu 30 - 220 MHz zcela konstantního zkušebního pole v referenčním bodě (1,0 m, vertikální rovina). Budeme proto sledovat jiný parametr, a to odchylku intenzity elektrického pole měřenou v jednotlivých bodech od střední hodnoty intenzity elektrického pole dané v bodě 1,0 m vertikální roviny. Jako přípustnou míru odchylky stanovíme ± 3 dB (odchylka vychází z požadavků definovaných v [100]), na grafech je tento limit vyznačen chybovými úsečkami vůči střední hodnotě. Zároveň tato analýza poslouží k posouzení homogenity zkušebního pole použitého při předcertifikačních měřeních vozidla.

Cílem experimentálního měření bylo ověřit použitelnost navržené metody a posoudit její vypovídací schopnosti z hlediska homogenity zkušebního pole. Ukazuje se, že volba 6 kalibračních bodů, oproti 16, je zcela dostatečná, neboť pro účely automobilového průmyslu dostatečně popisuje homogenitu pole v nejkritičtějších místech vozidla. Z obrázků (Obr. 88) a (Obr. 89) popisujících frekvenční závislost intenzity elektrického pole ve vertikálních kalibračních bodech, jasně vyplývá typická vyzařovací charakteristika použité antény při uvážení měřicí vzdálenosti umožňující získat přehled o homogenitě zkušebního pole použitého při zkoušce. Stejná situace nastává i v případě kalibračních bodů horizontální roviny (Obr. 90) a (Obr. 91).

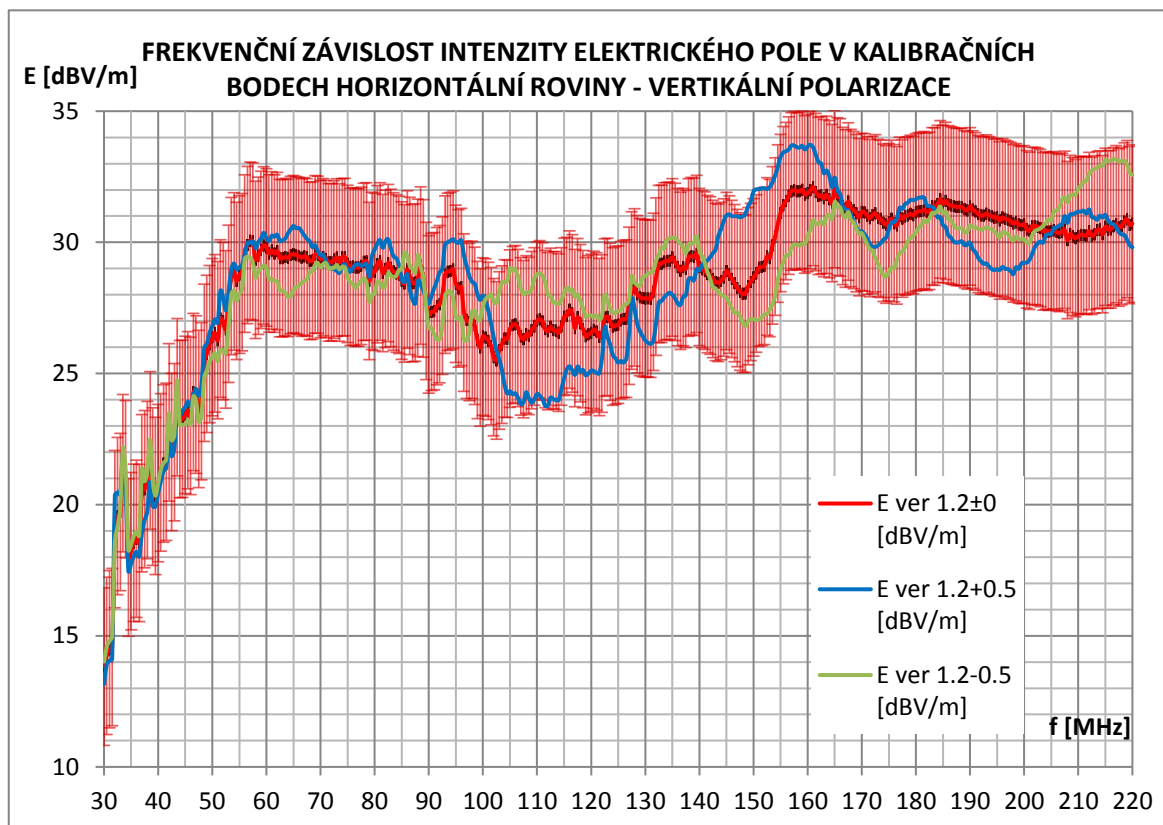
Zjištěná homogenita pole není zcela ideální. Z průběhů vyplývá, že zejména rozdíly mezi vertikálními kalibračními body při expozici horizontálně polarizovanou vlnou na počátku i konci zkoušeného frekvenčního pásma překračují stanovený toleranční limit ± 3 dB, ačkoliv ne příliš významně. Zejména při konci frekvenčního pásma je tato vlastnost dána vyšší směrovostí použité antény, kdy se uplatňuje více její logaritmicko-periodická část než část bikónická s odlišným vyzařovacím diagramem. Výrazný vliv má v tomto směru i použitá zemní rovina. Podstatně lepší situace je v případě horizontální kalibrační roviny, která je pro účely námi uvažovaného předcertifikačního měření více relevantní. Zde se projevuje opět typický průběh vyzařovacího diagramu dané antény, kdy rozdíly měřené ve vertikální rovině jsou téměř zanedbatelné. Lepší homogenity pole by bylo možno dosáhnout použitím většího odstupu antény od kalibračních bodů, nebo použitím, různých antén s odpovídajícími parametry. S tím ovšem přímo souvisí nutnost disponovat většími stíněnými prostory, ale zejména nutnost získat podstatně vyšší budící výkon antény, nutný pro generování pole dané intenzity.



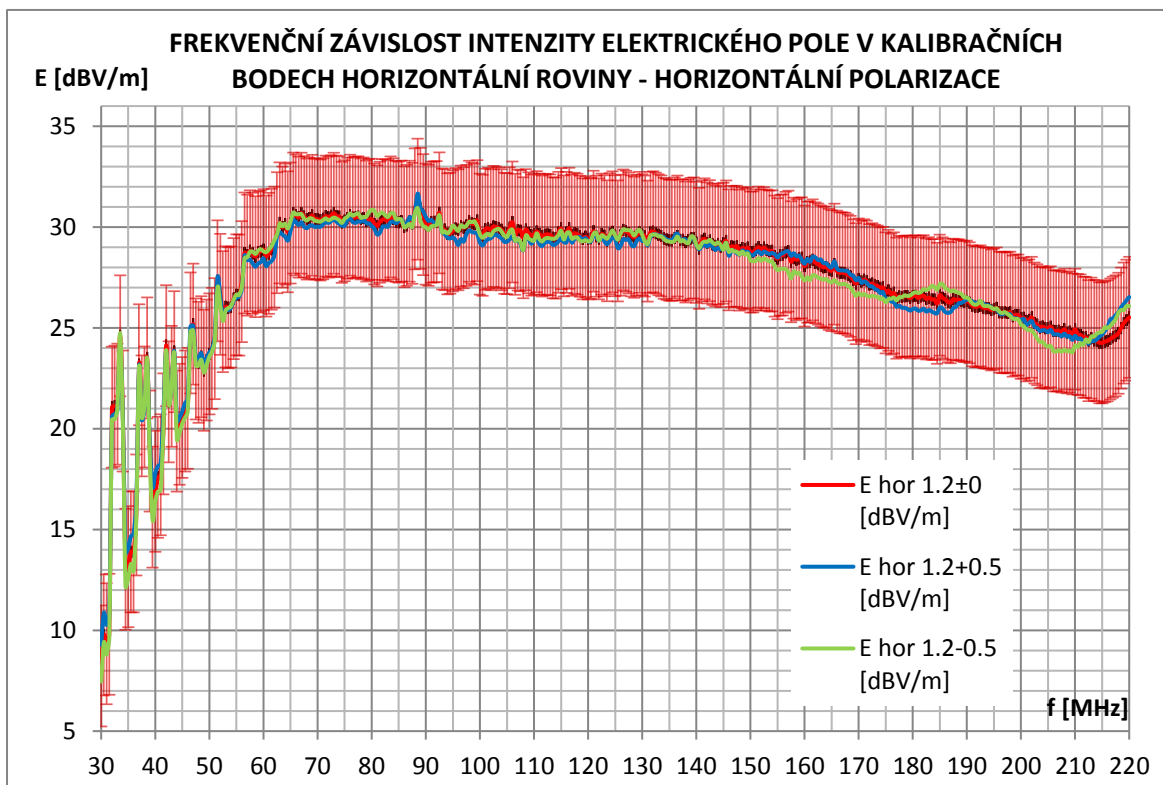
Obr. 88 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech 1,2 m, 1 m, 0,8 m a 0,5 m vertikální měřicí roviny pro vertikální polarizaci zkušební signálu.



Obr. 89 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech 1,2 m, 1 m, 0,8 m a 0,5 m vertikální měřicí roviny pro horizontální polarizaci zkušební signálu.



Obr. 90 - Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m horizontální měřicí roviny pro vertikální polarizaci zkušebního signálu.



Obr. 91 - Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m horizontální měřicí roviny pro horizontální polarizaci zkušebního signálu.

3.2.5. METODIKA MĚŘENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE UVNITŘ KAROSERIE VOZU

Neméně důležitou součástí předcertifikačních testů odolnosti vůči elektromagnetickým polím je správný a dobře reprodukovatelný způsob měření intenzity elektrického pole uvnitř vozidla. Praxe ukazuje, že pro dosažení dobrých výsledků, porovnatelných s výsledky numerických simulací a certifikačních měření musíme uvažovat následující aspekty:

- a) Výběr vhodné sondy elektrického pole včetně jejího nastavení.
- b) Volba vhodného komunikačního rozhraní sondy, včetně zpracování naměřených dat.
- c) Vhodný návrh měřicích bodů uvnitř karoserie vozidla.

Ad a)

Sondy určené pro měření intenzity elektrického pole při zkouškách odolnosti celých vozidel by měly být elektricky malé, isotropní a připojené k řídicím obvodům pomocí optických vláken, nebo vysokoimpedančních vodičů. To v praxi znamená relativně širokou nabídku různých výrobců těchto zařízení, neboť podmínky, které jsou pro měření požadovány, nejsou příliš omezující. Typický frekvenční rozsah předcertifikačních měření v době psaní této práce se pohybuje do 3 GHz (v této práci se zabýváme pouze nejkritičtějším frekvenčním rozsahem 30 - 220 MHz), při intenzitách polí do 30 V/m. Důležitým aspektem tak zůstává možnost získávání měřených dat z přístroje v reálném čase. Časová synchronizace, nezbytná pro párování dat v případě jejich ukládání v přístroji se po praktických pokusech jeví jako zcela nepoužitelná. Testovací sestava, resp. řídicí program, musí během kalibrace při každém frekvenčním kroku nastavit patřičnou hodnotu výkonu na generátoru testovacího signálu. Tento děj není z pohledu své délky vždy stejný a časová synchronizace není bez použití dlouhých časových oken možná.

Jako zástupce široké škály dostupných měřičů intenzity elektrického pole můžeme uvést přístroje firmy Narda [96], Maschek [98] a v automobilovém průmyslu z pohledu certifikačních testů velmi rozšířené společnosti Dare [99]. O praktických aspektech měření intenzity polí pomocí sondy Narda pak pojednává [97].

Ad b)

Praxe ukazuje, že nejspolehlivějším způsobem přenosu dat z měřicího zařízení, nacházejícího se ve stíněné komoře vně, je komunikace po optickém vlákne. Doporučujeme proto výhradní používání sond elektrického pole s tímto rozhraním. Pro vhodnou synchronizaci dat s aktuální frekvencí doporučujeme integraci datového rozhraní do řídicí aplikace, kterou ovládáme celý systém měření. Je totiž zcela nezbytné správně párovat informace o frekvenci nastavené na generátoru s měřenou intenzitou elektrického pole. K dispozici je řada komerčních SW, nabízejících možnost řídit zkoušky elektromagnetické odolnosti. Vzhledem k jejich ceně a jednoúčelovosti lze spíše doporučit tvorbu vlastního systému v zavedených vývojových prostředích (např. Agilent VEE, LabView nebo Matlab).

Ad c)

Umístění měřicích bodů v karoserii vozidla vyplývá ze snahy porozumět rozložení intenzity elektrického pole zejména v prostoru palubní desky (prvotní diskuze této problematiky je také zmíněna v kapitole 2.6.2). Definovali jsme proto 4 základní měřicí osy, kolmé na osu x vozidla. Rozmístění os by mělo dokázat dobře popsat postupný vnik vlny do vozidla a lokalizaci vlastních rezonancí karoserie v místech, kde se nachází většina řídících jednotek vozidla.

Na uvedených osách jsme vyznačili, stejně jako v případě numerické simulace, 14 měřicích bodů. Rozmístění jednotlivých měřicích os a bodů je možno vidět na obrázku (Obr. 92).



Obr. 92 - Interiér vozidla osazený komponenty zvolenými k předcertifikační zkoušce s vyznačenými osami měření.

Vlastní vyznačení os v karoserii bylo provedeno bavlněným lankem, pevně napnutým v karoserii vozidla. Na takto vyznačených osách jsou pak barevnými značkami zvýrazněny jednotlivé měřicí body. Tento způsob měření se ukázal jako nejvhodnější, zejména z hlediska přesnosti a jednoduchosti umístění sondy elektrického pole. Pro měřič intenzity elektrického pole byl vyroben podstavec z XPS polystyrenu umožňující jeho přesnou fixaci na definované pozici v karoserii, bez vlivu na rozložení intenzity elektrického pole.

3.3. PŘEDCERTIFIKAČNÍ MĚŘENÍ NA VYSTROJENÉ KAROSERII VOZU

Dle doporučení uvedených v kapitolách 3.1 a 3.2 provedeme předcertifikační zkoušku, s cílem identifikovat rozložení intenzity elektrického pole v karoserii. Konfigurace zkoušky je nastavena tak, aby výsledky měření byly dobře porovnatelné s realizovanou numerickou simulací.

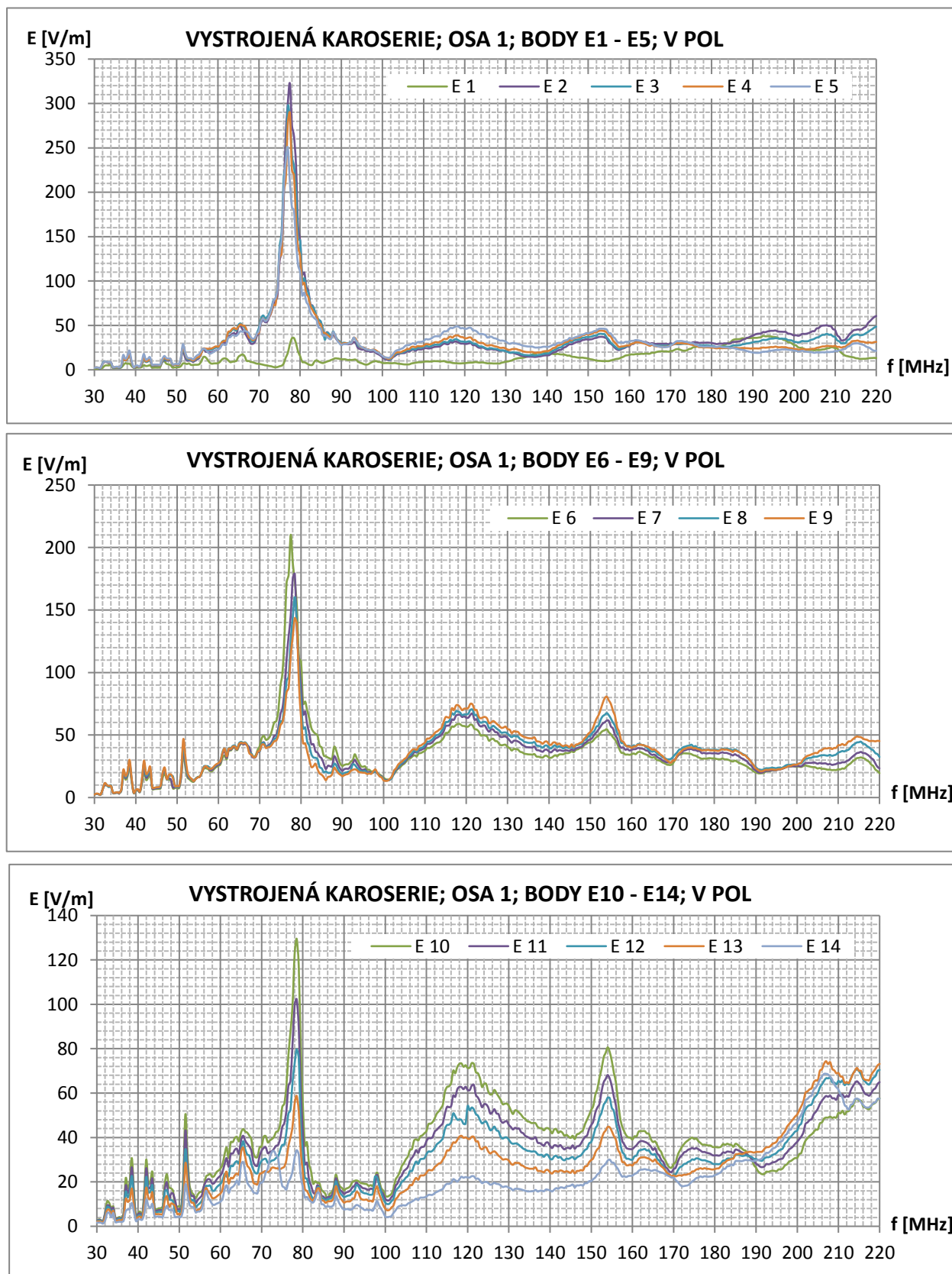
V levé horní části obrázku (Obr. 93) můžeme vidět anténu typu BiLog, sloužící jako zdroj testovacího pole. Na zemní rovině stíněné komory jsou pak vidět značky používané pro přesné určení polohy vozíku vůči zdroji pole. Vzhledem k vysoké časové náročnosti tohoto měření bylo nutno vozík do komory umisťovat opakovaně. Přesné určení polohy pomocí tří značek se tak ukázalo jako nejjednodušší a nejrychlejší způsob práce. Můžeme si rovněž všimnout, že při měření nebyla zemní rovina mezi zdrojem zkušebního pole a karoserií vozidla dodatečně obkládána pyramidálními absorbéry, aby se co nejvíce použitá zkušební metoda přiblížila metodě homologační. Zkouška byla provedena ve stíněné komoře společnosti ŠKODA AUTO a.s., technicky konstruované pouze na zkoušky vyzařování pomocí 3 m metody. Pracoviště tak nedisponuje potřebnou měřicí vzdáleností, pyramidálními absorbéry pro pohlcení vysokých zkušebních výkonů, ani další technikou (zejména systémem dálkového řízení a pozorování DUT).



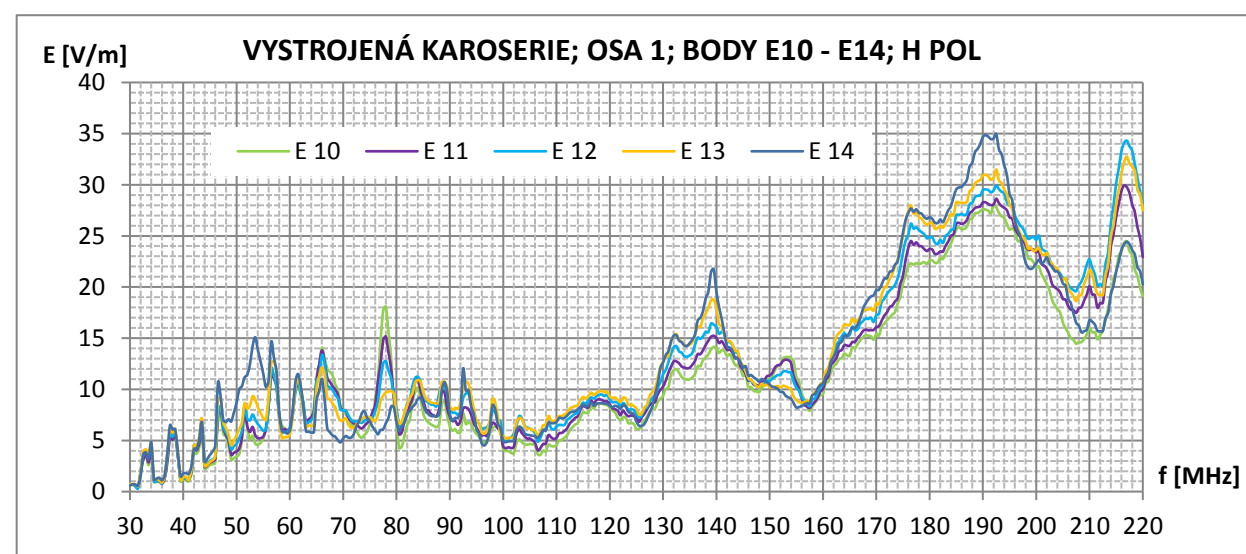
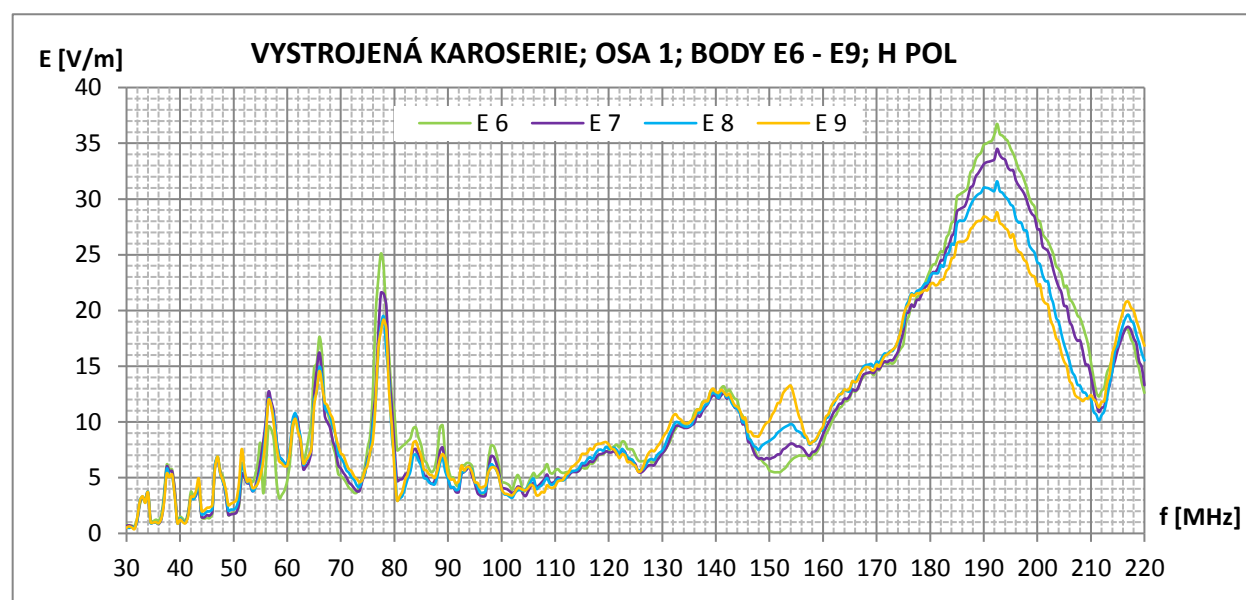
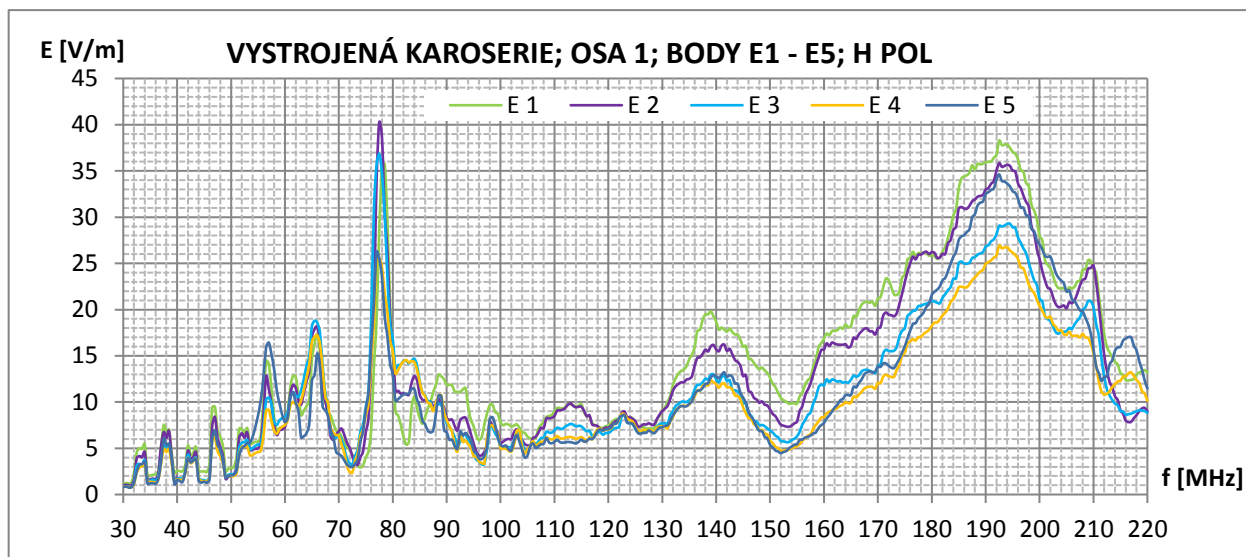
Obr. 93 - Ilustrační obrázek měření intenzity elektrického pole uvnitř karoserie vozidla na holé karoserii.

Zkouška byla realizována expozicí vystrojené karoserie vozidla vůči vnějšímu poli ve frekvenčním rozsahu 30 – 220 MHz, s vertikální i horizontální polarizací. Intenzita zkušebního pole byla volena dle kalibrační křivky (3.2.4) s $E = 30 \text{ V/m}$.

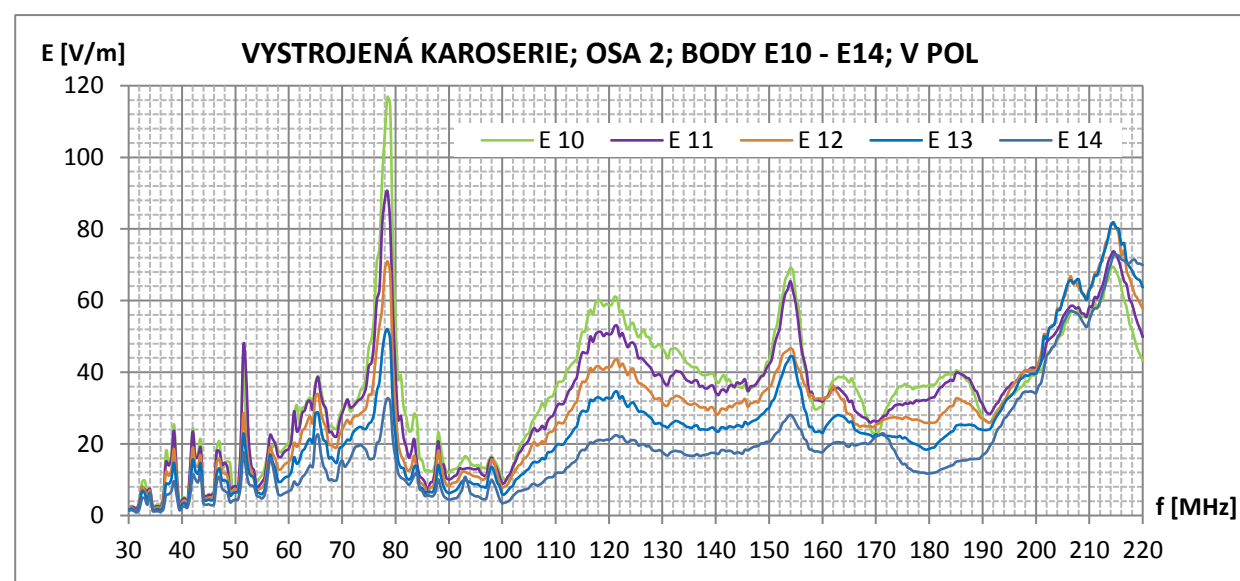
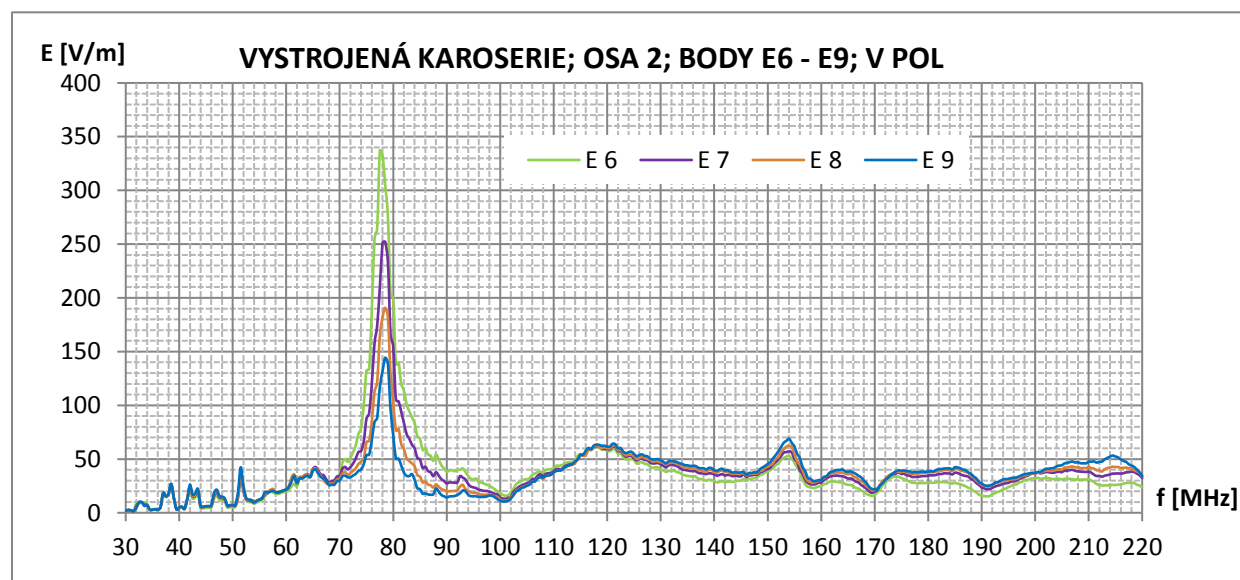
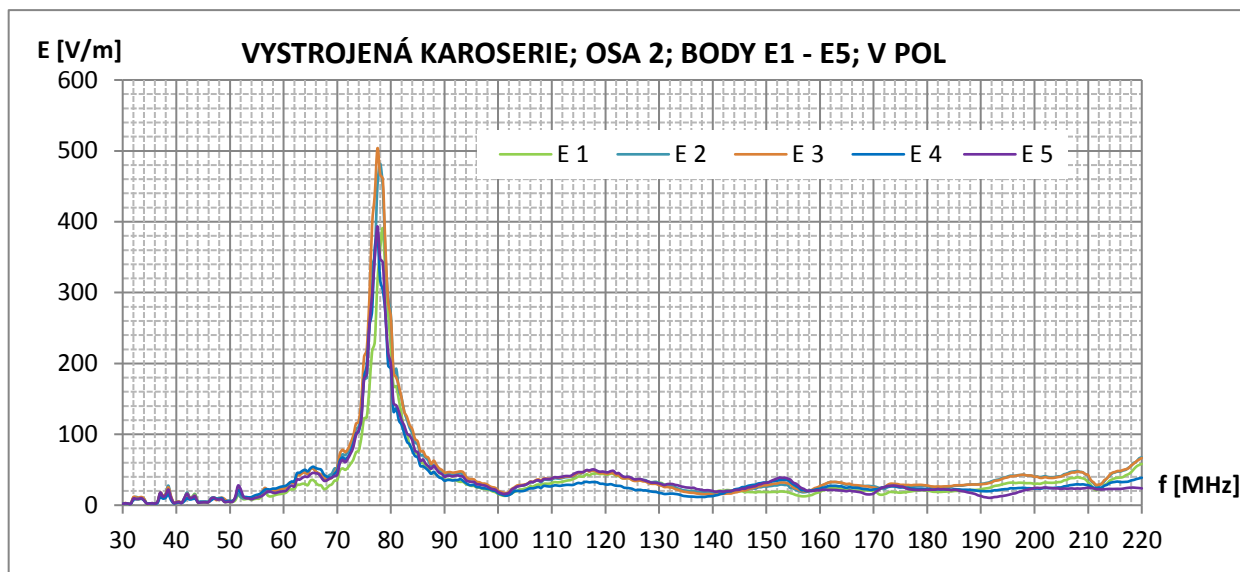
3.3.1. NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY



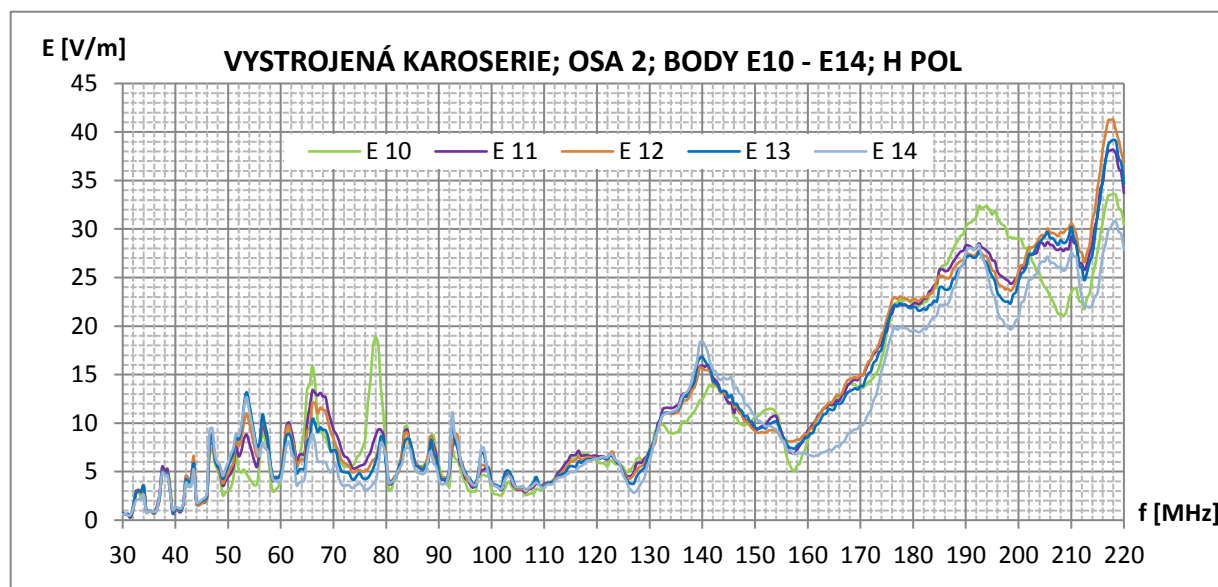
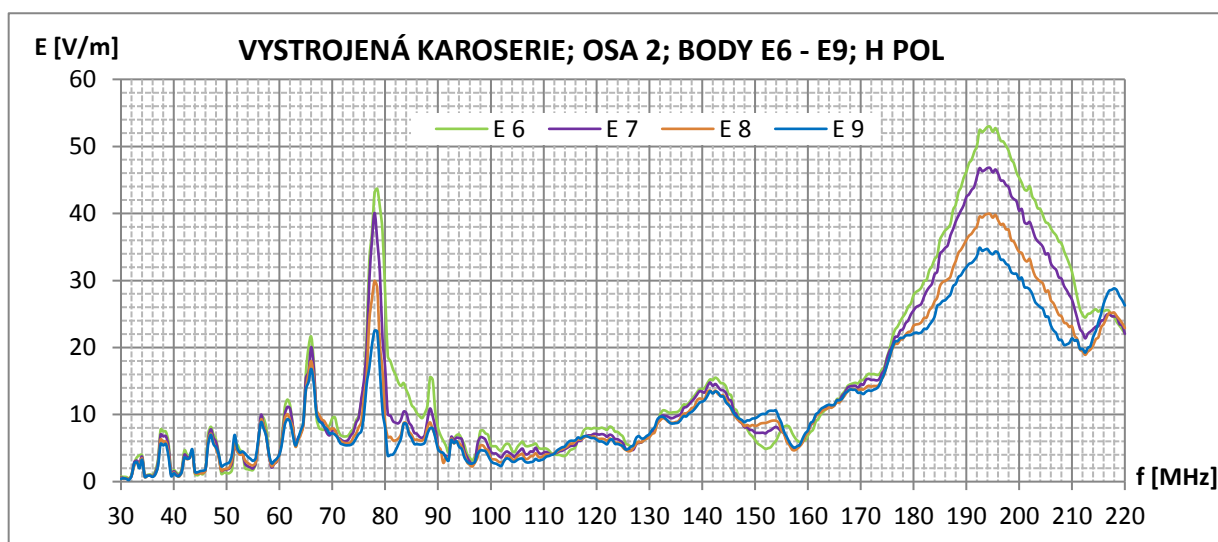
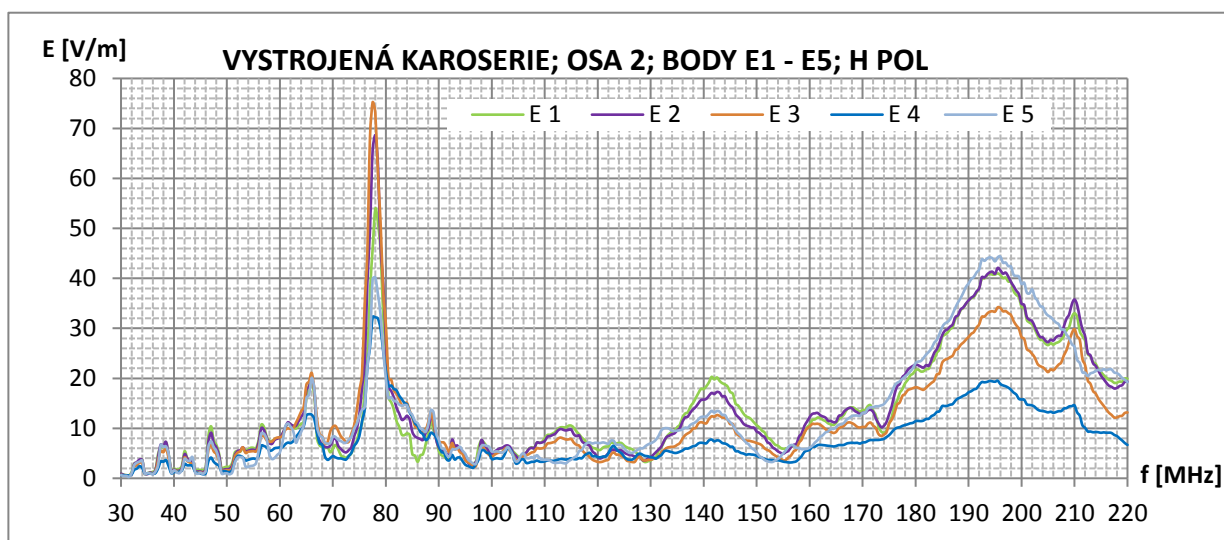
Obr. 94 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.



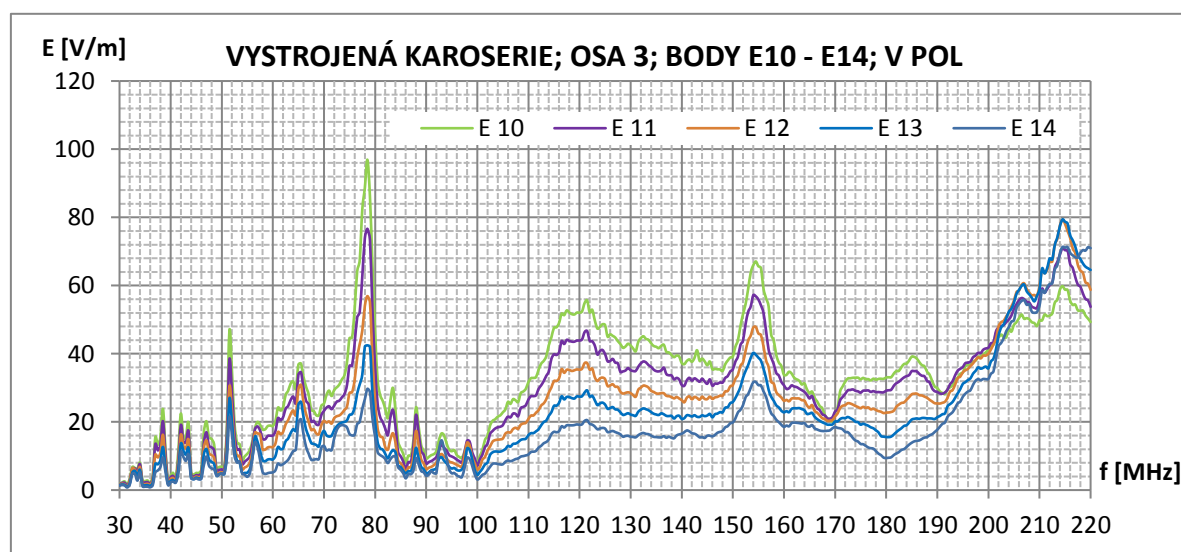
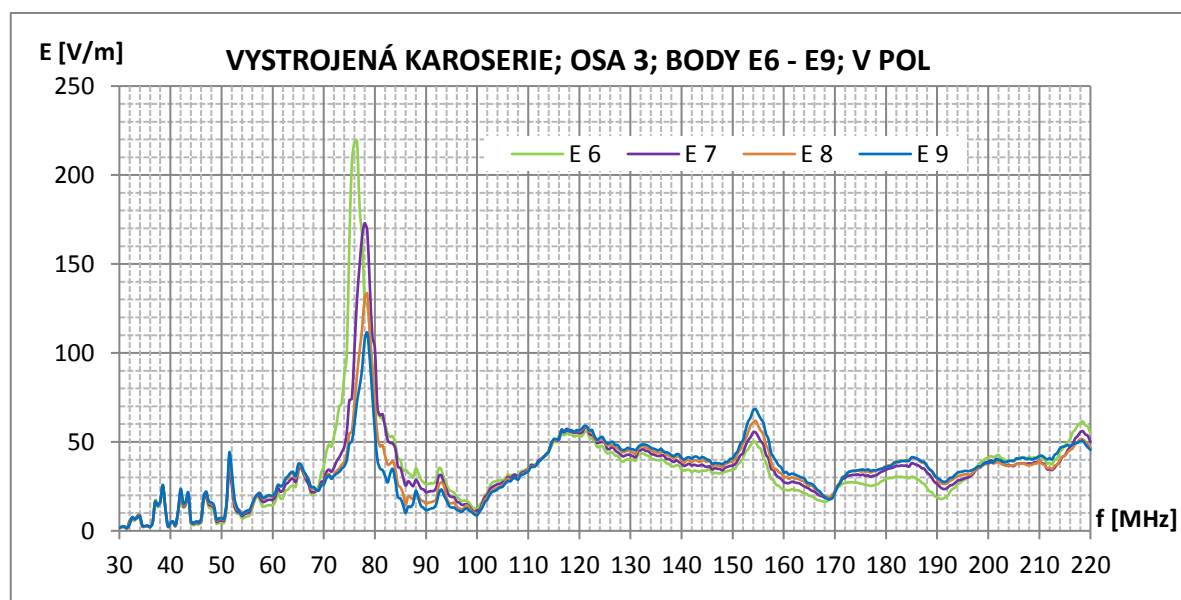
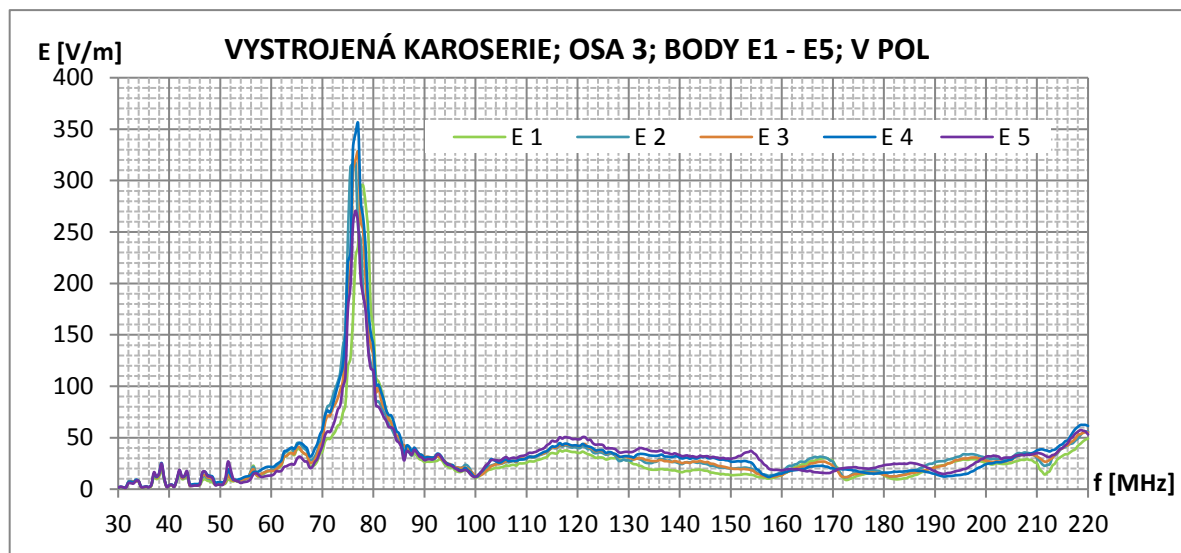
Obr. 95 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.



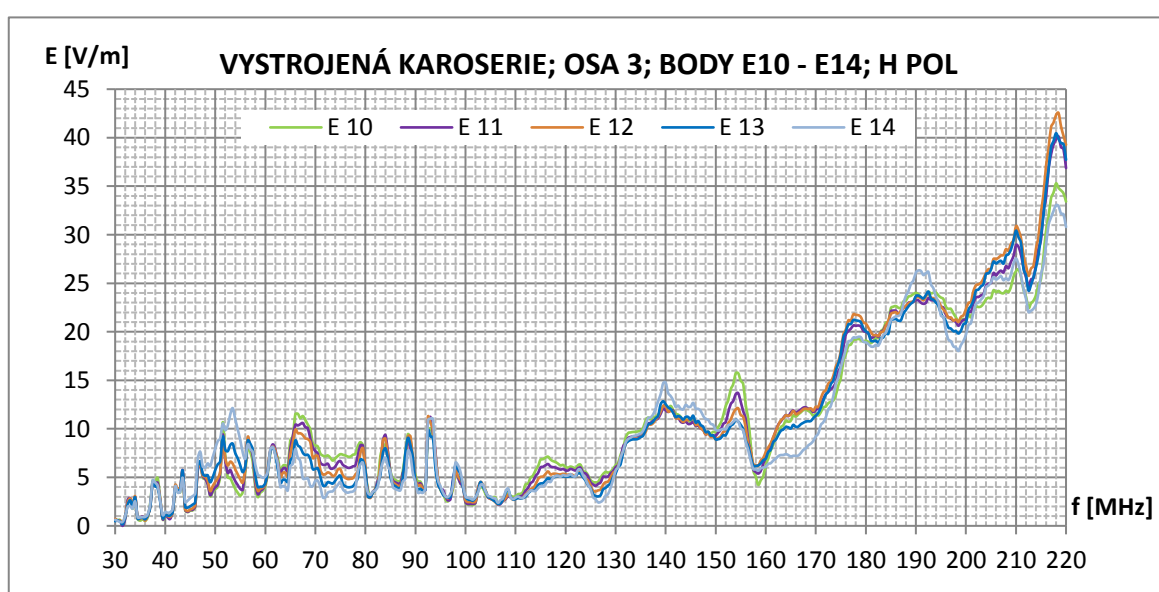
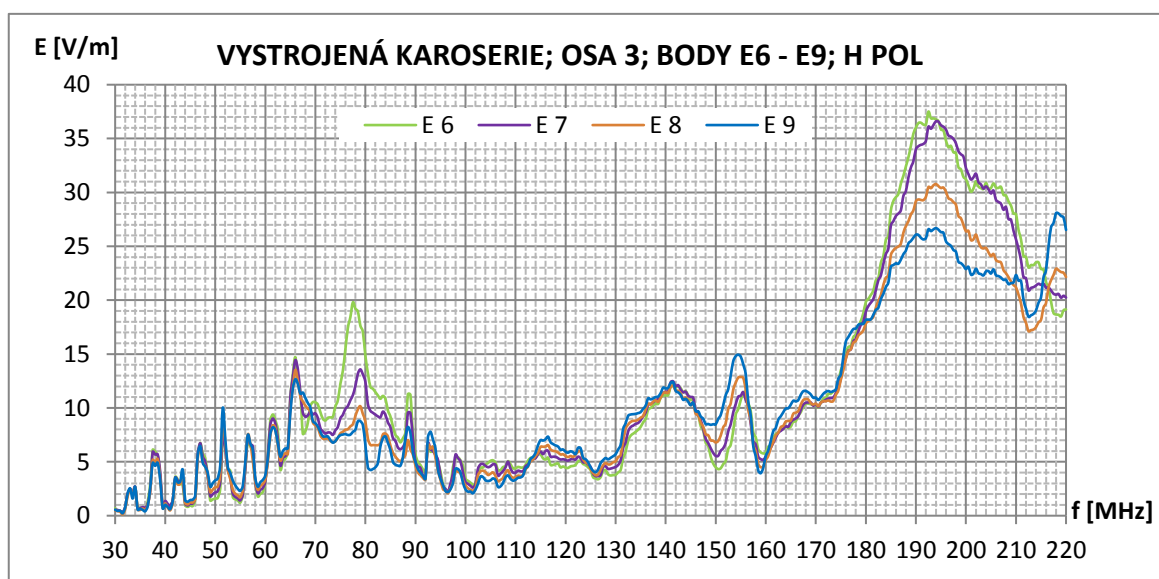
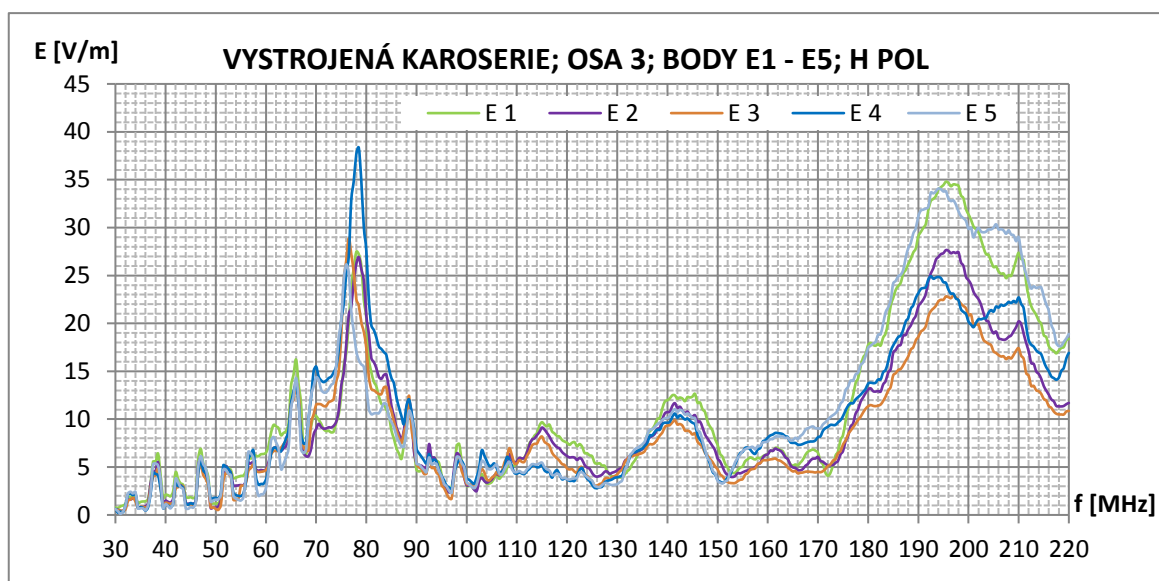
Obr. 96 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 2, vertikální polarizace.



Obr. 97 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 2, horizontální polarizace.



Obr. 98 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 3, vertikální polarizace.



Obr. 99 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 3, horizontální polarizace.

Výsledky prezentované v této kapitole byly naměřeny a zpracovány dle metodiky uvedené v předchozí části této práce. Vlastní měření jsme dle zmíněných doporučení provedli v měřicích osách 1 až 3, při respektování shodných bodů, jako při předcertifikační numerické simulaci. Stejně jako v případě numerické simulace jsme jednotlivé body rozdělili do 3 základních oblastí na každé ose. Body E1 – E5 reprezentují oblast volantu vozidla, včetně souvisejících ovládacích prvků. Body E6 – E9 popisují oblast středového panelu, včetně displeje systému infotainmentu. Zbývající body E10 – E14 reprezentují pravou část přední část palubní desky, včetně airbagu spolujezdce.

Výsledky měření získané v ose 1 je možno vidět na obrázku (Obr. 95) pro vertikální polarizaci a obrázku (Obr. 95) pro horizontální polarizaci. Celkový pohled na frekvenční závislost intenzity elektrického pole ukazuje, že pro velkou většinu zkoušených frekvencí je intenzita měřená uvnitř vozidla nižší, než intenzita kalibračního pole. To znamená, že karoserie vozidla tvoří překážku ve vniku vlny do svého vnitřního prostoru. Výjimku z tohoto stavu představují pouze lokalizované rezonanční frekvence. Při jejich výskytu můžeme měřit vysoký lokální nárůst intenzity elektrického pole, mnohdy překračující návrhový limit elektrických jednotek umístěných ve vozidle.

Ve všech skupinách měřicích bodů je zřejmá dominantní rezonance na frekvenci 78 MHz, zejména při expozici karoserie vertikálně polarizovanou vlnou (Obr. 95). Nejvyšší intenzity elektrického pole (310 V/m v měřicím bodě E2) bylo dosaženo na této frekvenci v oblasti volantu, kde jsou jednotlivé měřicí body umístěny v přímé blízkosti vodivých částí výztuhy sloupku řízení a intenzita elektrického pole byla výrazně ovlivněna proudy tekoucími po jejich povrchu. V ostatních částech vozu je rovněž tato frekvence dominantní, je ovšem zřejmé, že maximum se nachází právě v prostoru volantu, neboť s posuvem měřicích bodů směrem k pravé části vozu měřená intenzita významně klesá až na hodnotu 38 V/m v bodě E14.

Další dominantní frekvencí projevující se zejména ve střední a pravé části vozu je 120 MHz. Maximální hodnota intenzity elektrického pole dosahuje 75 V/m v bodech E7 až E10, umístěných v blízkosti výztuhy panelu systému infotainmentu. Posledním zjištěným rezonančním kmitočtem je 154 MHz. Tato frekvence je dominantní zejména v pravé části vozu a svého maxima dosahuje v měřicím bodě E10 (81 V/m), přičemž výrazná je i v bodech E8, E9 a E11, E12.

Při expozici karoserie horizontálně polarizovanou vlnou (Obr. 95) můžeme pozorovat podstatně vyšší stínící účinnost karoserie, než v případě expozice vlnou polarizovanou vertikálně. Rovněž vznik vlastních rezonancí karoserie je díky konfiguraci vnitřní dutiny posunut frekvenčně výše. Jako dominantní frekvence jsme identifikovali 78 MHz, 138 MHz a 192 MHz. Již známá frekvence 78 MHz dosahuje v případě této polarizace svého maxima opět v oblasti volantu, ovšem při maximální intenzitě elektrického pole pouze 40 V/m (bod E2). Je tedy patrné, že tento dominantní rezonanční kmitočet se projevuje u obou polarizací budící vlny, ovšem v případě vertikální polarizace dochází k vybuzení odlišných prvků tohoto uskupení. Vzhledem k rozměrům vnitřní dutiny a zjištěné frekvenci se nejedná o vlastní rezonanci vnitřního prostoru, ale spíše o rezonanci jednotlivých prvků výztuhy karoserie a sloupku řízení, což ostatně potvrzuje i numerická simulace a analýza povrchových proudů.

Rezonanční frekvence 194 MHz se nejvíce přibližuje teoretickým předpokladům pro vznik vlastní rezonance dutiny v módu TE_{111} . Distribuce intenzity elektrického pole je ve všech bodech téměř shodná, což odpovídá předpokladům o rozložení pole v nejnižších módech rezonanční dutiny. Maxima je dosaženo v bodě E1 (37 V/m), intenzita el. pole v ostatních bodech však neklesá pod úroveň 25 V/m.

Osa 2 je ve vozidle umístěna o 10 cm níže než osa 1, nachází se tedy blíže centrální výztuze palubní desky i ostatním komponentům na této výztuze umístěným. Frekvenční závislost intenzity elektrického pole měřenou v této ose ukazuje obrázek (Obr. 96) pro vertikální polarizaci a obrázek (Obr. 97) pro polarizaci horizontální. Můžeme opět pozorovat dominantní frekvence 78 MHz, 120 MHz a 154 MHz v případě expozice vertikálně polarizovanou vlnou a 78 MHz, 140 MHz a 194 MHz při expozici vlnou polarizovanou horizontálně. Získané výsledky se významně neodlišují od hodnot získaných v ose 1.

Jedinou výjimku tvoří dominantní frekvence 78 MHz. Umístěním sondy elektrického pole blíže rezonujícím prvkům (výztuha sloupku řízení s volantem) došlo k výraznému nárůstu měřené intenzity právě na této dominantní frekvenci až na hodnotu 500 V/m v bodě E3, při expozici vertikálně polarizovanou vlnou. Stejně jako v předchozím případě klesá intenzita elektrického pole směrem k měřicímu bodu E14 a to až na hodnotu 30 V/m. Maximum je tedy stále lokalizováno v levé části vozu. K nárůstu hodnoty měřené intenzity došlo i v případě horizontální polarizace, kdy na frekvenci 78 MHz byla v bodě E3 měřena maximální intenzita 75 V/m.

Tento poznatek potvrzuje domněnku o určujícím vlivu prvků výztuhy palubní desky na hodnotu rezonanční frekvence a dosažené maximum intenzity elektrického pole. Rezananční frekvence 78 MHz tak není určena rozměry vnitřní dutiny karoserie, ale právě rozměry a umístěním jednotlivých částí výztuhy.

Výsledky získané pro osu 3 při vertikální polarizaci zkušební pole (Obr. 98) a horizontální polarizaci zkušební pole (Obr. 99), ukazují na obdobný frekvenční průběh jako v případě osy 1. Všechny dominantní frekvence jsou i v této ose zachovány a ve spektru neposunuty. Je ovšem patrný vliv prvků spodní části výztuhy karoserie na změnu hodnot měřené intenzity, zvláště pak od frekvence 150 MHz výše. Tento vliv se uplatňuje zejména při expozici horizontálně polarizovanou vlnou, kdy maximum dosahuje v bodě E6 a E7. V blízkosti těchto bodů se nachází prvky výztuhy spojující centrální část výztuhy karoserie s podlahou vozidla. Dle mapy proudového rozložení protékají těmito prvky významné proudy z oblasti sedadel, což v kombinaci s uzavřenou smyčkou výztuhy způsobuje nárůst intenzity právě v uvedených měřicích bodech.

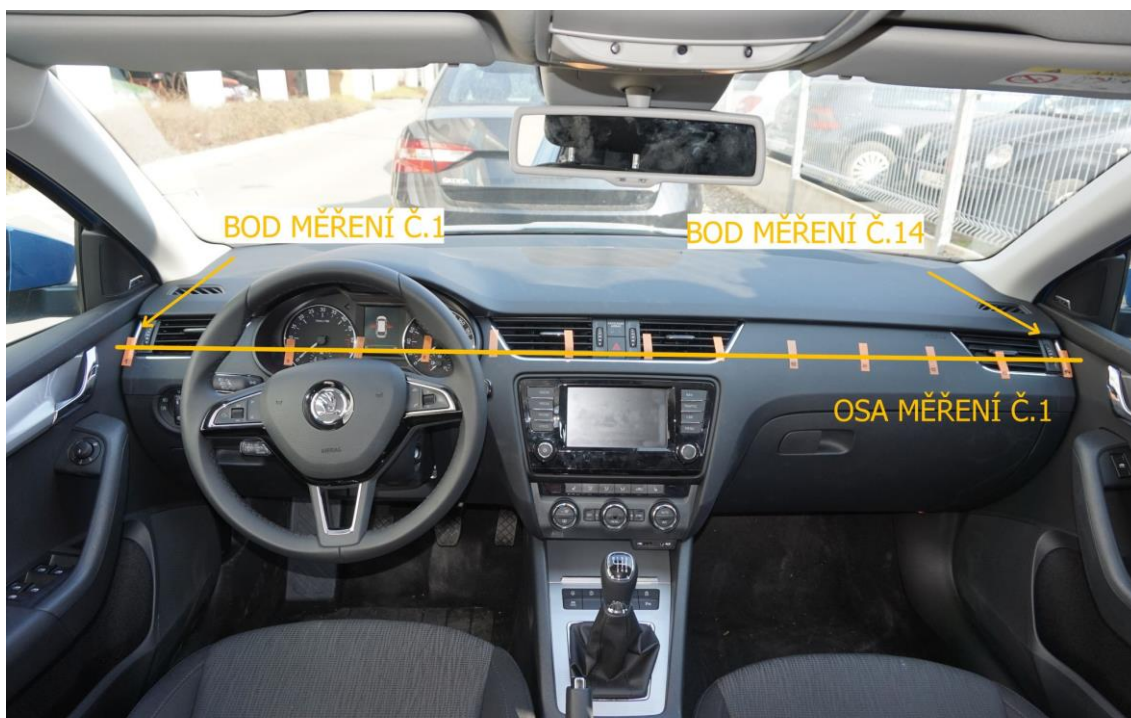
Souhrnně můžeme říci, že ve všech měřicích osách dominují stejné rezonanční frekvence. Rozdíly v měřených intenzitách elektrických polí jsou způsobeny blízkostí jednotlivých částí výztuhy karoserie a proudy tekoucími po těchto částech, zejména v rezonanci. Nejvyšších a tedy pro kabelové svazky a jednotky nejnebezpečnějších intenzit elektrického pole bylo jednoznačně dosaženo při expozici vertikálně polarizovanou vlnou při měření v ose 1. Doporučujeme proto provádět předcertifikační měření prováděné za účelem identifikace rizikových frekvencí právě v této ose. Obecnou pozici této osy stanovujeme jako spojnicí bodů umístěných v levých a pravých předních dveřích vozidla. Tyto body jsou umístěny ve vzdálenosti 10 cm od kraje A sloupku v úrovni hrany okenní výplně (ukázka viz Obr. 92).

3.4. PŘEDCERTIFIKAČNÍ MĚŘENÍ NA CELÉM VOZE

Dle stejné metodiky, jako v případě měření na vystrojené karoserii, provedeme předcertifikační měření i na voze Škoda Octavia v sériovém neodstrojeném stavu. Vozidlo je technicky zcela shodné s odstrojenou karoserií, při jeho výběru byl kladen důraz i na shodnost elektrické výbavy, zejména z důvodu potenciálně odlišného tvaru výztuhy palubní desky. Stejně jako v předchozím případě, bude vozidlo exponováno vertikálně i horizontálně polarizovanou vlnou z čela vozidla o intenzitě $E = 30 \text{ V/m}$ (dle kalibrační křivky – kapitola 3.2.4) ve frekvenčním rozsahu 30 – 220 MHz. Cílem tohoto experimentu je získat zdrojová data pro porovnání rozdílů intenzit měřených v holé karoserii, podporující vznik rezonančních fenoménů s plně vystrojeným vozidlem, jehož interiér je vyplněn plastovými a látkovými dílci pohlcujícími určitou část energie přicházejících i odražených vln. Specifickým problémem je pak přítomnost pokovených skleněných výplní, způsobujících další útlum při vniku vlny do vnitřního prostoru karoserie.

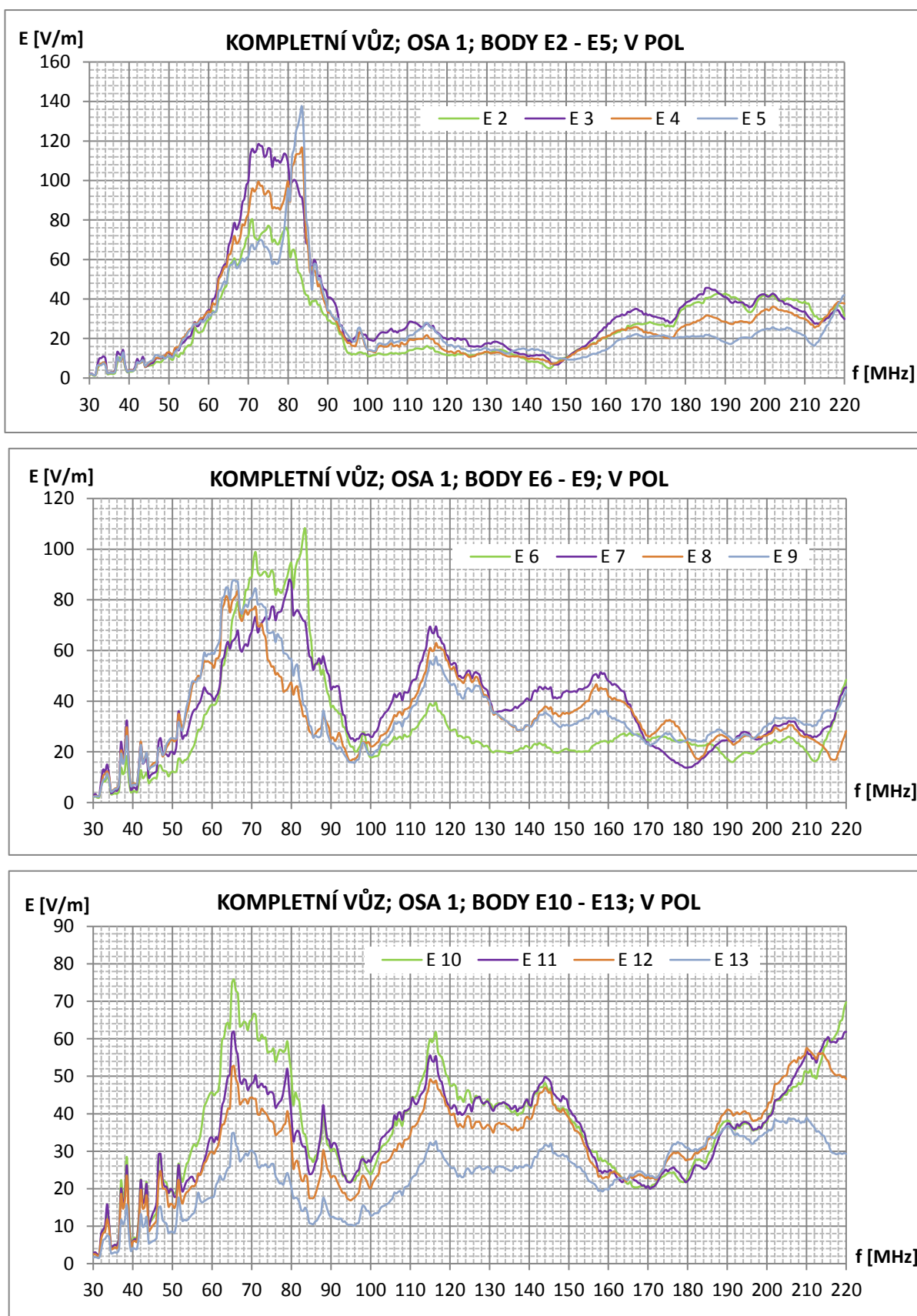
Díky zachování dominantních kovových prvků můžeme očekávat podobné frekvenční rozdělení rezonančních fenoménů, ovšem díky útlumu při průchodu vlny pokovenými skleněnými výplněmi a přítomnosti pohlcujících materiálů uvnitř karoserie s podstatně nižšími maximy intenzity elektrického pole.

Měřicí body (viz Obr. 100) jsou opět rozděleny do třech skupin. Body E2 – E5 reprezentují oblast volantu vozidla, včetně souvisejících ovládacích prvků. Body E6 – E9 pak popisují oblast středového panelu vozidla, včetně displeje systému infotainmentu. Zbývající body E10 – E13 reprezentují pravou část palubní desky, včetně airbagu spolujezdce. Dle této logiky jsou jednotlivé průběhy rozděleny do grafů. Vzhledem k přítomnosti plastových výplní dveří nebylo možno umístit sondy do bodů E1 a E14, budou proto zanedbány. Výsledky měření budou prezentovány pouze pro osu 1, neboť jak bylo dokázáno v předchozí kapitole, popis v této linii je dostačující pro nezbytnou identifikaci dominantních frekvencí a maxim intenzit na nich dosažených.

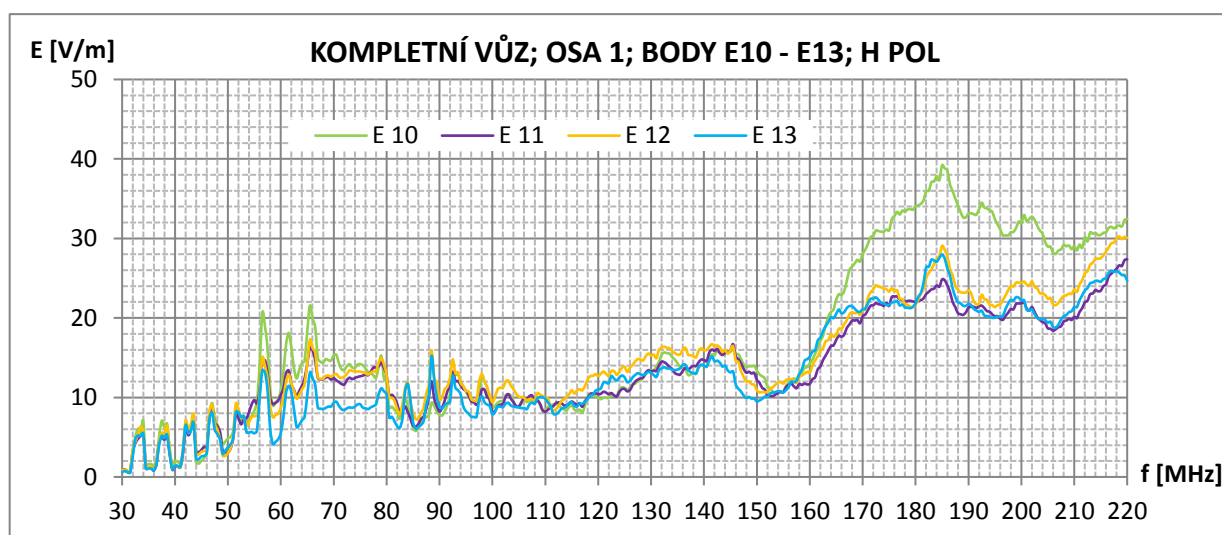
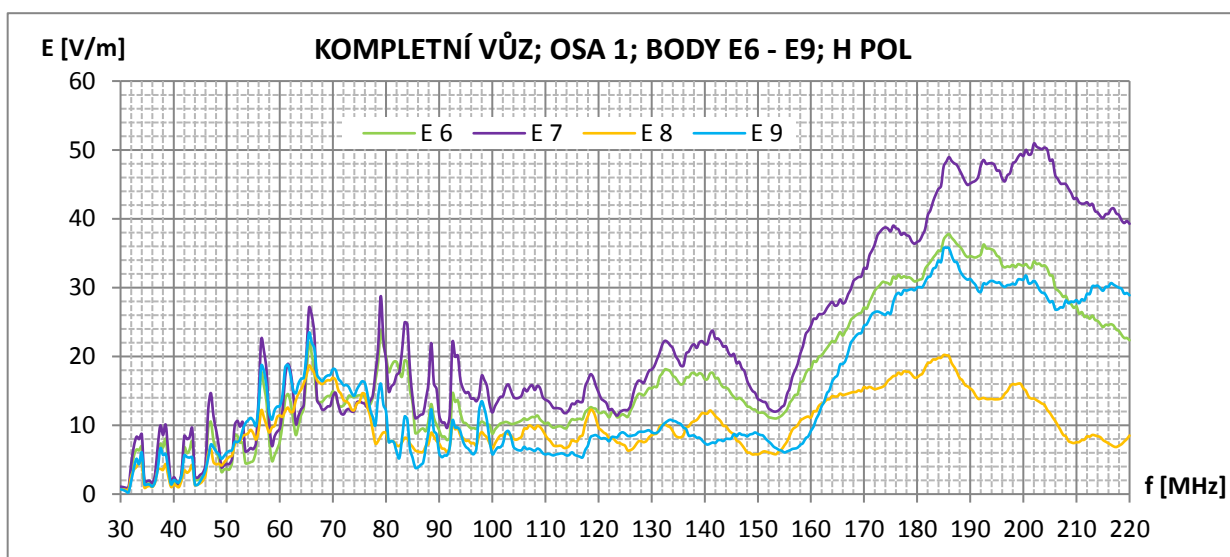
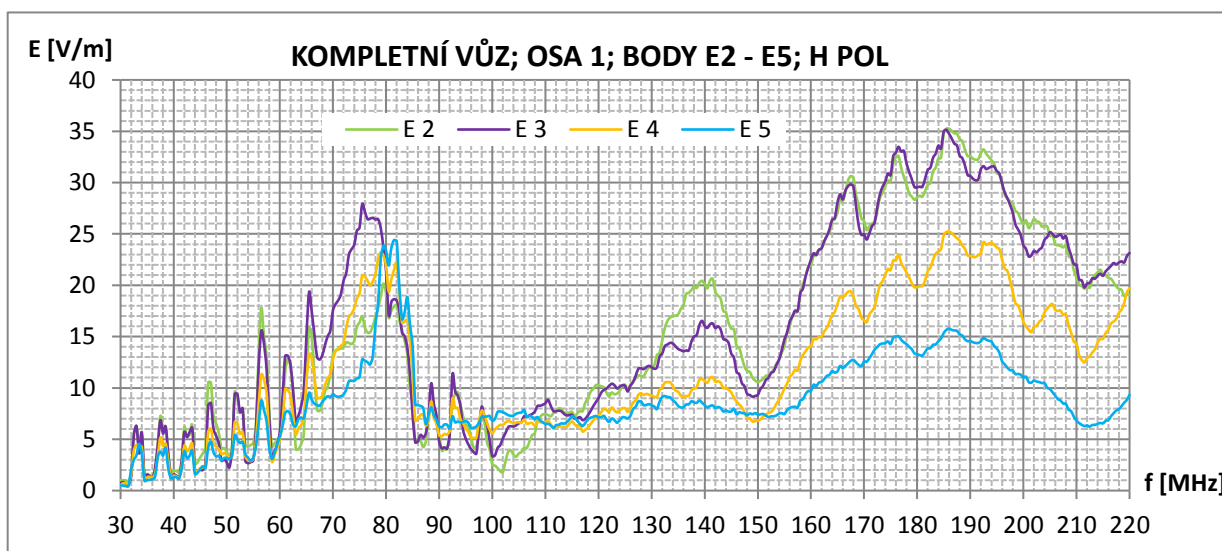


Obr. 100 – Umístění měřicích bodů a os v sériovém vozidle pro účely předcertifikačního měření.

3.4.1. NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY



Obr. 101 - Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, kompletní vůz, osa 1, vertikální polarizace.



Obr. 102 - Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, kompletní vůz, osa 1, horizontální polarizace.

Předcertifikační měření na sériovém voze ukázalo významná specifika, zejména v oblasti šířky rezonančních fenoménů a jejich maximální intenzity elektrického pole. Na obrázku (Obr. 101) můžeme vidět sady výsledků pro expozici vozu vertikální polarizací. Ve skupině bodů E2 - E5 (volant a sloupek řízení) pozorujeme pouze jediný významný rezonanční fenomén mezi 70 – 80 MHz ve všech bodech dané skupiny (E2 - E5) s maximem v bodě E3 a intenzitou pole 118 V/m. Specifickým kmitočtem je pak maximum na 84 MHz, pozorovatelné výhradně v bodech E4 a E5. Žádné další významné frekvence nebyly při měření zaznamenány.

Oproti tomu se ve skupině bodů E6 – E9 (střední část vozidla) vyskytují rezonanční frekvence silně lokalizované do specifických bodů měření. Maximum na frekvenci 63 MHz pozorujeme v bodech E8 a E9 s intenzitou 85 V/m. Naopak rezonanční frekvence 84 MHz byla zaznamenána pouze v bodech E6 a E7. Navíc se v této skupině vyskytuje i maximum na frekvenci 116 MHz, lokalizované do bodů E7 – E9 s intenzitou pole 70 V/m. V pravé části vozu (skupina bodů E10 – E13) jsou maxima rozložena obdobně jako v předchozí skupině s tím rozdílem, že tato maxima můžeme pozorovat ve všech bodech dané skupiny. Klíčové jsou frekvence 65 MHz (maximální intenzita 75 V/m), 79 MHz (maximální intenzita 60 V/m) a 116 MHz s maximální intenzitou 62 V/m.

Při expozici vozu horizontálně polarizovanou vlnou (Obr. 102) se projevují obdobná specifika, jako u expozice vertikálně polarizovanou vlnou. Ve skupině bodů E2 – E5 je opět dominantní oblast 72 – 82 MHz patrná ve všech bodech skupiny s maximem v E3 a intenzitou 28 V/m. Silně prostorově ohraničené výsledky ovšem pozorujeme mezi frekvencemi 175 a 185 MHz. Zatímco v bodech E2 a E3 je maximální intenzita elektrického pole 35 V/m, v ostatních bodech skupiny nedosahuje ani 20 V/m.

Ve skupině E6 – E9 se vyskytují rezonanční fenomény pouze v oblasti 185 až 200 MHz, maxima je zde dosaženo v bodě E7 (maximální intenzita 50 V/m). Opět zde pozorujeme ostrou prostorovou lokalizaci frekvenčních maxim. Naopak ve skupině E10 – E13 je dosaženo výrazného maxima pouze v bodě E10 na frekvenci 185 MHz (maximální intenzita 40 V/m), ostatní body ukazují shodný průběh bez významných rezonančních fenoménů.

Z tohoto pozorování vyplývá, že vznik jednotlivých maxim v sériovém voze je oproti měření v karoserii ostře ohraničen do malých oblastí popsanych pouze několika měřicími body. Domníváme se, že situace je způsobena odlišnou hloubkou zástavby výztuhy palubní desky, jakožto hlavního rezonančního prvku, do okolních materiálů způsobujících útlum procházející vlny, a tedy odlišný vliv na vazbu vnějšího a vnitřního prostředí. Je rovněž patrné, že maximální měřené intenzity v sériovém vozidle jsou v maximech podstatně nižší, než ve vystrojené karoserii. Tento jev přisuzujeme zejména zvýšení celkového stínícího účinku karoserie vybavené v tomto případě pokovenými skly, vyplnění vnitřního prostoru ztrátovými materiály způsobujícími pohlcení části energie elektromagnetického vlnění a tedy utlumení rezonančního projevu jednotlivých prvků, i vnitřního prostoru karoserie samotné. Podrobné srovnání výsledků získaných na vystrojené karoserii a sériovém voze lze nalézt v další kapitole.

3.5. SROVNÁNÍ ROZDÍLŮ MĚŘENÍ NA VYSTROJENÉ KAROSERIE A CELÉM VOZE

V kapitolách 3.3.1 a 3.4.1 byly prezentovány výsledky dosažené za totožných podmínek při předcertifikační zkoušce elektromagnetické odolnosti pro vystrojenou karoserii vozu a kompletní sériový vůz. Cílem této kapitoly je zhodnocení specifických rozdílů mezi těmito odlišnými předměty zkoušky a přijetí vhodných opatření pro vzájemnou porovnatelnost výsledků získaných na těchto odlišných DUT.

Na obrázku (Obr. 103) můžeme vidět rozdíl intenzity elektrického pole měřeného ve vystrojené karoserii a sériovém voze při expozici vertikálně polarizovanou elektromagnetickou vlnou. Odlišnosti můžeme spatřovat zejména v:

- 1) měřené intenzitě elektrického pole v rezonanci,
- 2) pozici rezonanční frekvence,
- 3) šířce pásma v rezonanci (změna činitele jakosti rezonanční dutiny).

Z porovnání vyplývá, že největší rozdíl z hlediska měřené intenzity byl zaznamenán v oblasti dominantní rezonanční frekvence 78 MHz. V případě holé karoserie se jedná o maximální hodnotu 340 V/m se strmostí 47,5 V/m na 1 MHz, oproti 136 V/m se strmostí 10 V/m na 1 MHz v sériovém voze. Největší rozdíly byly zaznamenány na této frekvenci zejména v levé části vozu (body E2 – E5), což ovšem vyplývá i z maximální intenzity elektrického pole, která byla naměřena v právě této části interiéru. Další významný rozdíl měřené intenzity elektrického pole jsme zaznamenali rovněž i na ostatních rezonančních frekvencích. Jedná se zejména o kmitočty 118 MHz a 154 MHz. Míra poklesu intenzity elektrického pole je i zde přímo úměrná maximální hodnotě intenzity pole v dané rezonanční frekvenci. Důvod snížení intenzity elektrického pole měřeného v celém voze oproti vystrojené karoserii spatřujeme v:

- Zeslabení vazby vnějšího prostředí na prostředí vnitřní, zejména z důvodu vyšší stínící účinnosti karoserie sériového vozu opatřeného pokovenými skly a z toho vyplývajícím nižším množstvím energie pronikajícího do vnitřního prostoru karoserie, na základě, které začínají jednotlivé prvky rezonovat.
- Přítomnosti materiálů pohlcujících elektromagnetické vlny uvnitř karoserie sériového vozu, způsobující snížení množství násobných odrazů od kovových částí karoserie.

Dalším aspektem vyplývajícím z porovnání jsou frekvenční posuvy a rozšíření dominantních oblastí frekvenčních maxim. V případě karoserie se jedná o úzkou frekvenční špičku na 78 MHz, oproti širokému pásmu maxima mezi 72 a 82 MHz v sériovém voze. Důvod tohoto chování spatřujeme v následujících vlivech:

- V případě vystrojené karoserie nastávají rezonance na jejích dominantních a tedy jasně určených prvcích. Uplatňují se rovněž rozměry vnitřní dutiny, určující její přirozené rezonanční módy. Na rozdíl od toho se v sériovém voze do rezonančních procesů zapojují navíc i kabelové svazky umístěné buď přímo, nebo v těsné blízkosti dominantních rezonančních prvků a určitou mírou i pokovené prvky umístěné přímo na palubní desce. Vzhledem k tomu, že některé z výše uvedených součástí tvoří vodivé smyčky, mohou tyto smyčky způsobit posuv rezonanční frekvence, nebo vznik jiné.
- Šířka pásma rezonance rovněž úzce souvisí s jakostí rezonanční dutiny Q. Jakost této dutiny je v případě sériového vozu podstatně nižší než u vystrojené karoserie, neboť vodivé stěny rezonátoru, i povrchy jednotlivých výztuh jsou pokryty dodatečnými

pohlcujícími materiály, což v případě použití holých výztuh ve vystrojené karoserii neplatí.

Na obrázku (Obr. 104) můžeme vidět rozdíl intenzity elektrického pole měřeného ve vystrojené karoserii a sériovém voze při expozici horizontálně polarizovanou vlnou. Můžeme si všimnout, že ve většině měřicích bodů došlo k poklesu intenzity elektrického pole měřeného v sériovém voze jak v rezonanci, tak i mimo ni. Tento jev je zejména patrný ve střední a pravé části vozu. Příčinu tohoto jevu spatřujeme stejně jako v případě vertikálně polarizované vlny v zeslabení vazby vnějšího a vnitřního prostředí, způsobené pokovenými skleněnými výplněmi vozu, neboť polarizace vlny nemá v tomto případě na její průchod pokoveným sklem vliv.

Významné rozdíly v intenzitách el. polí měřených v sériovém voze pozorujeme od 160 MHz výše. Zatímco ve vystrojené karoserii byl frekvenční průběh intenzity v bodech dané skupiny téměř shodný, v sériovém voze pozorujeme ostrou prostorovou lokalizaci maxim na vybraných bodech. Děje se tak zejména v oblasti bodů E3 - E5 v levé části vozu a v bodech E6 - E9 ve střední části vozu. Domníváme se, že tento jev je zejména způsoben odlišnou hloubkou zástavby výztuhy palubní desky, jakožto hlavního rezonančního prvku, do okolních materiálů způsobujících útlum procházející vlny a měnící tedy i způsob jejího odrazu. Dalším aspektem je fyzická přítomnost stínících krytů řídicích jednotek a pokovených ozdobných částí vozu, které byly v případě vystrojené karoserie zcela zanedbány. Na frekvencích ke konci zkoušeného pásma přestávají být tyto vodivé prvky elektricky zanedbatelné a jejich přítomnost způsobuje lokální nárůst intenzity pole, pokud je měřena v jejich blízkosti.

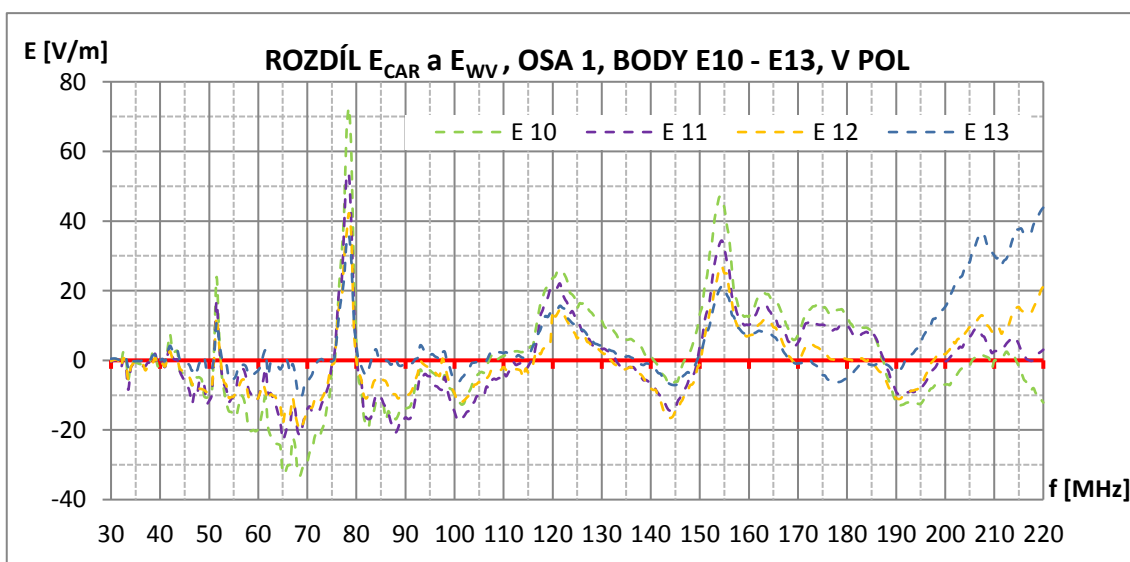
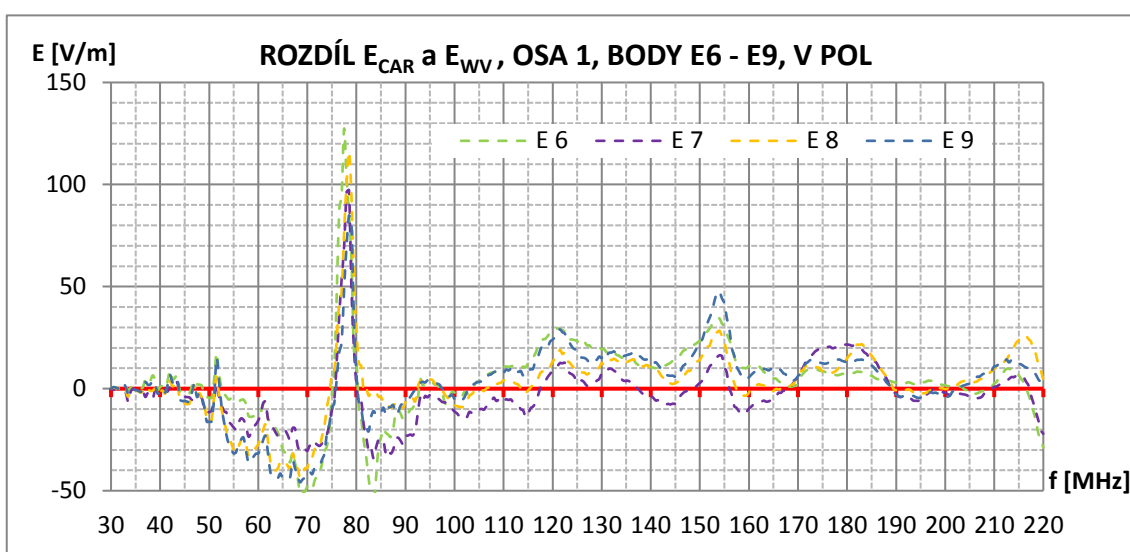
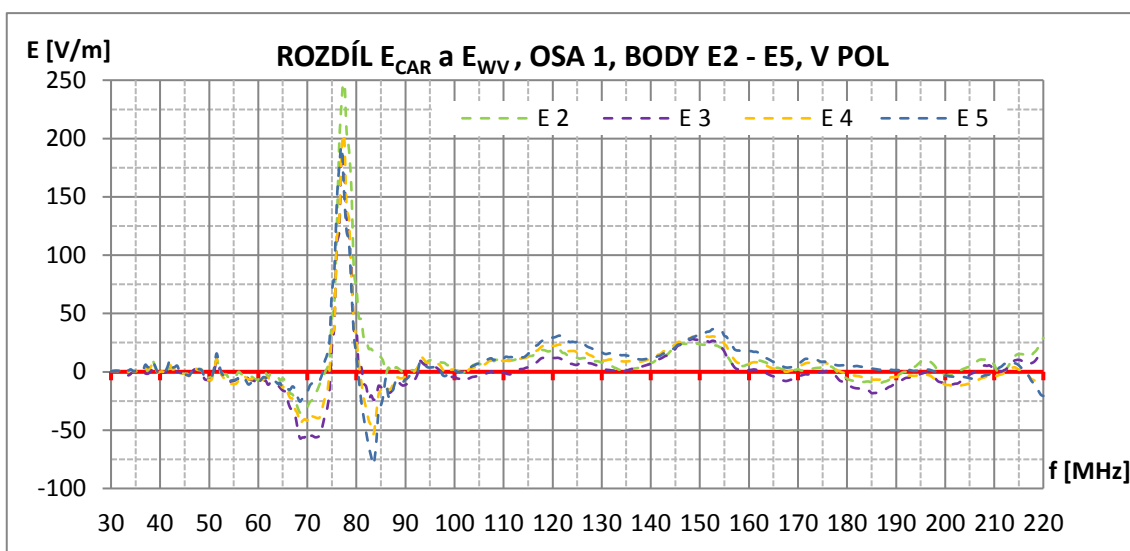
V oblasti změny či posuvu rezonančních kmitočtů můžeme pozorovat rozšíření maxima 78 MHz v případě vystrojené karoserie na pásmo 72 - 82 MHz v případě sériového vozu. Tento jev i zde souvisí s jakostí rezonanční dutiny Q, podstatně snížené výplní vnitřního prostoru posádky plastovými, skleněnými a látkovými díly. K rozšíření maxima v sériovém voze došlo pouze v levé části vozu (body E2, E3, E4), neboť v ostatních bodech se toto maximum při expozici vertikálně polarizovanou vlnou neuplatňuje.

Z výše uvedených pozorování můžeme učinit následující závěry:

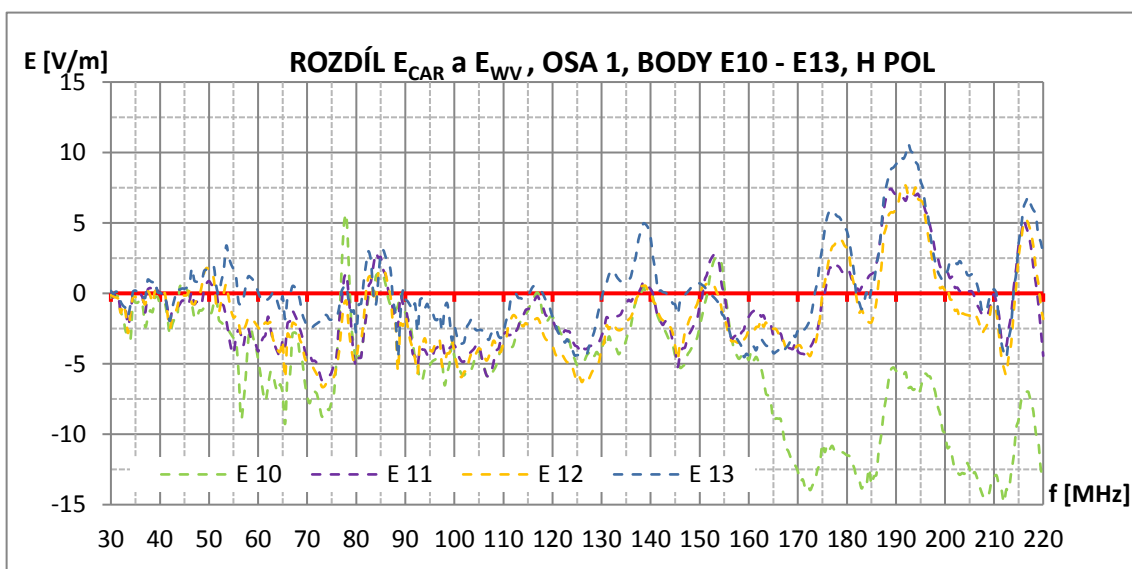
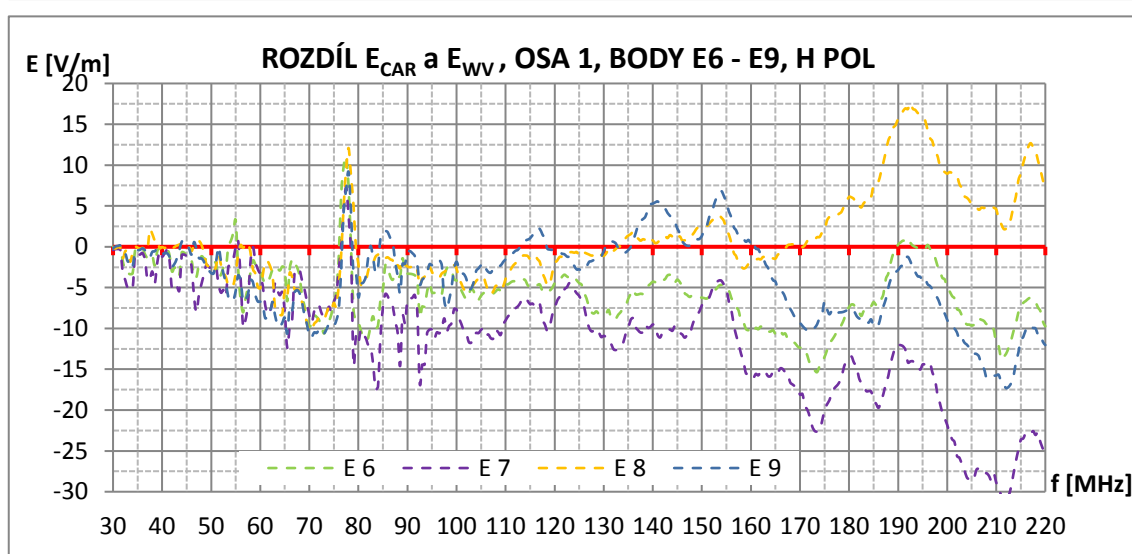
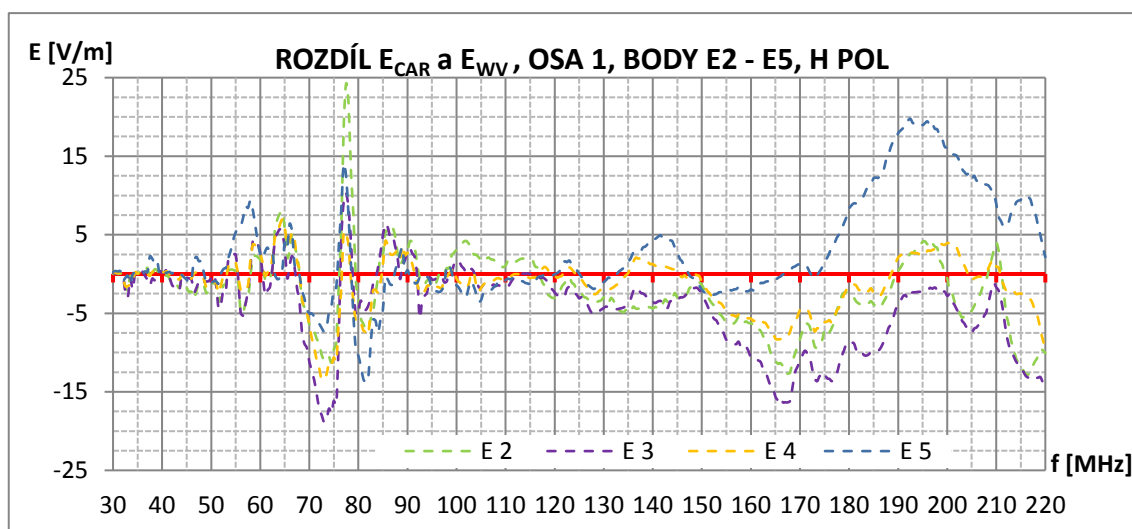
Pohled na výsledky získané ve vystrojené karoserii zprostředkuje souhrn systémového rozložení intenzity pole v prostoru, definované zejména jejími dominantními prvky (rozměry vnitřní dutiny, vazební otvory, výztuha palubní desky, sedadla). Výsledky z tohoto měření jsou ve skupinách bodů téměř shodné a dobře popisují rezonanční chování karoserie jako celku v daných bodech. Můžeme je proto využít jako souhrn předpokládaných rizikových faktorů daných obecným prostředím karoserie. Tyto výsledky jsou velmi vhodné pro verifikaci výstupů numerických simulací, které v naprosté většině případů neuvažují vnitřní ztrátové prostředí karoserie, navíc doplněné o velmi složitý popis různých dielektrických materiálů v umístěných v kompletním voze.

V případě měření na sériovém voze se významně uplatňují zejména na horním okraji zkoumaného pásma jednotlivá lokální maxima způsobená dílčí zástavbou řídicích jednotek a chromových prvků, navázaných na utlumené projevy vnitřního prostředí definovaného dominantními prvky karoserie vozu. Z toho vyplývá i oblast použitelnosti tohoto druhu výsledků, zaměřených spíše na lokální popis rozložení intenzity pole ve sledovaném prostoru. Ačkoliv jsou měření v sériovém voze nejbližší reálné zkoušce elektromagnetické odolnosti, pro předcertifikační měření představují až příliš složitou variantu práce. V naměřených datech je nezbytné určit, jaká maxima jsou způsobena chováním celkového vnitřního prostředí karoserie (vlastní rezonance dutiny

a dominantních prvků) a která dodatečně zastavěnými prvky a chromovými rámečky. Nutnost této selekce je způsobena faktem, že chování vnitřního prostředí v určitém vozovém projektu je přes jednotlivé výbavy vozu až na velké výjimky neměnné. Oproti tomu, maxima způsobená chromovými prvky a další zástavbou jednotek velmi závisí na výbavové variantě automobilu a při falešné identifikaci rizika z nich plynoucích, může dojít ke zcela zbytečnému předimenzování požadavků na ostatní díly, které jsou ve skutečnosti vlivem těchto prvků dotčeny pouze minimálně. Pro identifikaci rizik plynoucích ze systémového vnitřního prostředí lze proto spíše doporučit měření na vystrojené karoserii, nebo rozmístění měřicích bodů v sériovém voze spíše do volného prostoru, než do blízkosti zájmových řídících jednotek.



Obr. 103 – Rozdíl intenzity elektrického pole měřeného v holé karoserii vůči plně vystrojenému sériovému vozidlu. Předcertifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.



Obr. 104 - Rozdíl intenzity elektrického pole měřeného v holé karoserii vůči plně vystrojenému sériovému vozidlu. Předcertifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.

3.6. SHRNUTÍ KAPITOLY A DOPORUČENÍ PRO PŘEDCERTIFIKAČNÍ MĚŘENÍ

V kapitole 3 jsme podrobně zkoumali možnosti předcertifikačního měření. V kapitole 3.1 jsme se zabývali klíčovou volbou – výběrem vhodného předmětu zkoušky. Pro provádění vlastních předcertifikačních měření jsme stanovili dva základní typy DUT: karoserii vozu vystrojenou výztuhou palubní desky a sedadly pro co nejjednodušší verifikace výstupů numerických simulací a kompletní sériový vůz. Podrobně jsme prozkoumali důležitost správného procesu demontáže vozu, kde je klíčovým parametrem zachování kvalitního vodivého spojení všech částí vozu. Důležitost tohoto aspektu spočívá zejména ve snaze nezměnit tok povrchových proudů tekoucích při zkoušce elektromagnetickým polem po karoserii a neposunout, či zcela nezměnit rezonanční chování modelu vycházejícího právě z průtoku těchto proudů.

V kapitole 3.2 jsme diskutovali vlastní doporučenou realizaci předcertifikačních testů. První zkoumanou problematikou bylo v kapitole 3.2.1 měřicí pracoviště. Jako velmi výhodné bylo identifikováno provádění předcertifikačních zkoušek v prostředí stíněných stanů. Byly diskutovány jejich vlastnosti z pohledu stínící účinnosti a vlastních rezonancí.

Dále byly v kapitole 3.2.2 diskutovány aspekty technického vybavení pro předcertifikační testy. Jako klíčový prvek bylo zmíněno použití USB low-cost RF generátorů, antén typu BiLog a rovněž byly doporučeny kroky ke správné volbě nezbytného výkonu RF zesilovače. Vzhledem k tomu, že výkonový RF zesilovač je nejdražší součástí přístrojového vybavení pro předcertifikační zkoušky, je velmi důležité určit, jaká intenzita zkušebního pole je nezbytná pro identifikaci rizikových míst v karoserii vozidla. Vzhledem k aspektům certifikačního měření a zkušebním intenzitám při něm používaných byla pro předcertifikační testy doporučena intenzita 30 V/m alespoň v 90 % pásma 30 – 220 MHz.

Jako nejvhodnější zkušební metodu pro předcertifikační zkoušky v kapitole 3.2.3 jsme identifikovali metodu substituční, umožňující nejvhodnější přístup k provádění zkoušky a kalibraci nezbytného výkonu. Metoda je založena na prvotní kalibraci měřicího místa na požadovanou úroveň intenzity zkušebního pole, která je následně použita při realizaci zkoušky s DUT.

V kapitole 3.2.4 byly diskutovány aspekty certifikace měřicího místa a uniformity zkušebního pole. Pro tuto problematiku byly navrženy vlastní postupy. Jako referenční bod bude používána osa předních kol vozidla, neboť představuje z hlediska rozložení uniformního pole ideální pozici pro expozici klíčových řídících jednotek umístěných v blízkosti tohoto místa ve voze. Vhodnost tohoto bodu navíc podtrhuje jeho jednoduchá a jednoznačná identifikace na každém vozidle.. Bylo rovněž navrženo 6 kalibračních bodů umístěných v klíčových pozicích karoserie vozidla, zcela dostačujících pro posouzení uniformity pole z pohledu automobilové EMC. Body byly navrženy ve dvou rovinách: vertikální a horizontální. V případě vertikální roviny se body nacházejí ve výšce 0,5 m, 0,8 m, 1 m a 1,2 m nad zemní rovinou. V případě horizontální roviny se body nacházejí v konstantní výšce 1,2 m nad zemní rovinou umístěny - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m od podélné osy vozidla.

V kapitole byla rovněž dle výše uvedené metody posouzena dosažená uniformita pole na vlastním předcertifikačním pracovišti. Bylo zjištěno, že požadovaná uniformita pole s tolerančním limitem ± 3 dB nebyla dosažena ve všech bodech, avšak je vzhledem k použitému typu antény a rozměrům předcertifikačního pracoviště akceptovatelná.

Dále byla v kapitole 3.2.5 zvolena metodika měření intenzity elektrického pole v karoserii. Byly navrženy 4 měřicí osy respektující rozložení klíčových jednotek v karoserii vozidla a umožňující vhodný popis vazby vnějšího a vnitřního prostředí vozidla z hlediska šíření elektromagnetických vln. Tyto osy byly dále rozděleny na 14 měřicích bodů. Jejich počet odpovídá vnitřnímu rozměru karoserie dělenému maximální velikostí segmentu sítě použitého numerického modelu násobeného koeficientem 1,3.

V kapitole 3.3 jsme na základě předchozích poznatků provedli předcertifikační měření na vystrojené karoserii vozu vertikálně i horizontálně polarizovanou vlnou. Ke zkoušce byla zvolena konstantní intenzita elektrického pole 30 V/m, odpovídající technickým možnostem pracoviště. Při měření jsme v případě vertikální polarizace pozorovali dominantní rezonanční frekvence na kmitočtech 78 MHz, 120 MHz a 154 MHz. Zvláště v maximu na frekvenci 78 MHz byly naměřeny v oblasti sloupku řízení a volantu velmi vysoké intenzity elektrického pole, až 310 V/m. Při expozici horizontálně polarizovanou vlnou jsme zaznamenali maxima na frekvencích 78 MHz, 138 MHz a 192 MHz, intenzity elektrického pole v maximech i mimo ně však dosahovaly významně nižších úrovní. Ze všech měřených os byly největší intenzity měřeny v ose 1 při vertikální polarizaci. Doporučujeme proto provádět předcertifikační měření právě na této ose 1. Obecnou pozici této osy stanovujeme jako spojnicí bodů umístěných v levých a pravých předních dveřích vozidla. Tyto body jsou umístěny ve vzdálenosti 10 cm od kraje A sloupku v úrovni hrany okenní výplně (ukázka viz Obr. 92). Byla rovněž prokázána výhodnost seskupování výsledků měření do jednotlivých oblastí. Hodnoty intenzit se ukázaly v dané skupině bodů podobné a umožňovaly tak jednoduché porovnání změn intenzit mezi oblastmi, nebo při změně konfigurace testu.

Předcertifikační měření na sériovém voze v kapitole 3.4 ukázalo na zřejmé rozdíly při provádění zkoušky na vystrojené karoserii a běžném vozidle. Při pozorování frekvenčních maxim zjištěných již na vystrojené karoserii se ukázalo, že šířka pásma těchto frekvenčních špiček je u sériového vozu podstatně větší. Toto chování vyplývá z odlišné jakosti rezonanční dutiny, která je v případě vystrojené karoserie podstatně vyšší, neboť se ve vnitřním prostoru vozidla nacházejí výhradně vodivé součásti vozu. Naopak prostor vozu v sériovém stavu je vystrojen množstvím plastových, látkových a skleněných součástí, výrazně snižujících jakost této dutiny. Pozorovali jsme rovněž významný pokles měřené intenzity elektrického pole u sériového vozu a to jak v oblasti frekvenčních maxim, tak i v ostatních částech zkoušeného pásma. Tento jev vyplývá ze zvýšení stínící účinnosti karoserie sériového vozu, neboť tato je vybavena pokovenými skleněnými výplněmi způsobujícími útlum procházejících vln a tím snižují míru vazby vnějšího a vnitřního prostředí. Vliv na tento jev má i snížená jakost rezonanční dutiny, ve které tak dochází ke vzniku podstatně nižších rezonančních maxim. Detailním srovnáním se zabývá kapitola 3.5.

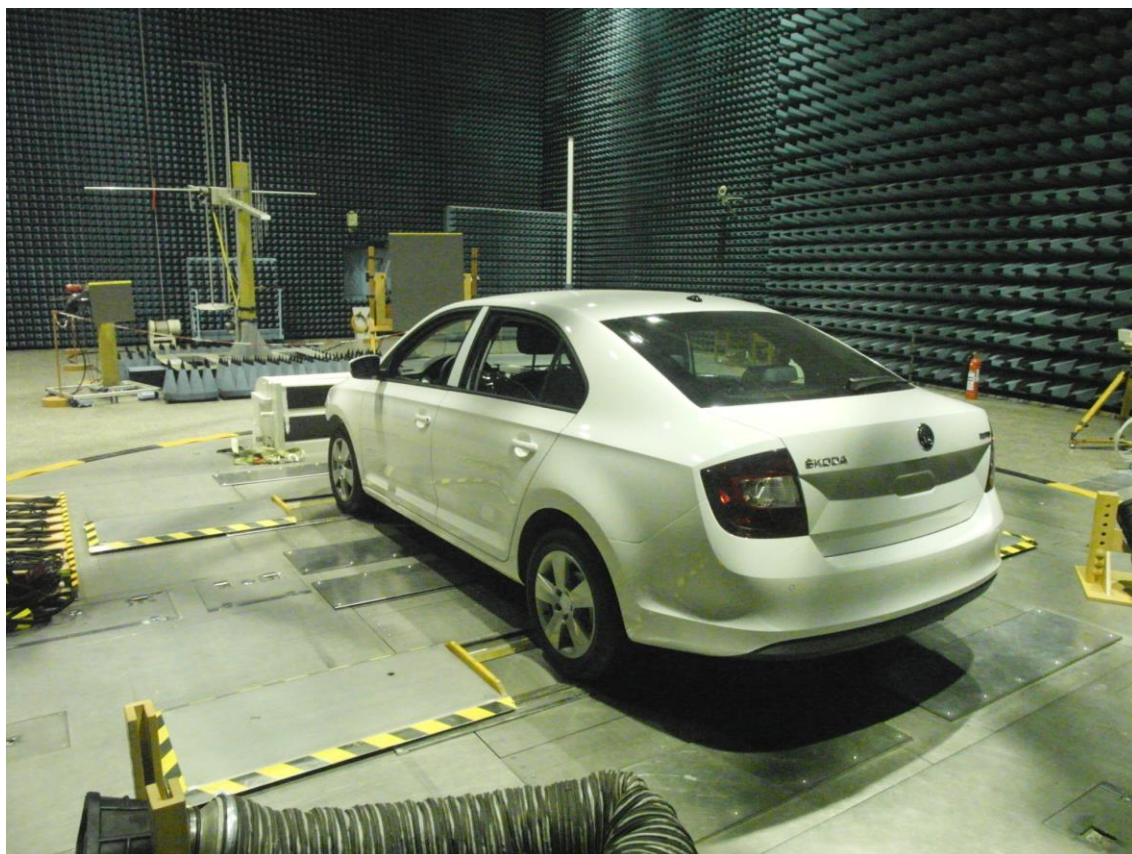
Díky měřením prezentovaným v kapitolách 3.3 a 3.4 jsme získali rozsáhlou sadu dat pro porovnání reálných měření s výstupy numerických simulací. Je tak možné provést objektivní srovnání shody těchto dvou sad výsledků a na základě míry této shody vyhodnotit správnost zde doporučovaných postupů předcertifikačního měření.

4. CERTIFIKAČNÍ MĚŘENÍ

V certifikačním měření vidíme pro účely této práce finální způsob ověření výsledků dosažených pomocí numerických simulací a předcertifikačních měření. Certifikační měření bylo realizováno na pracovišti zkoušek elektromagnetické odolnosti EMC oddělení Volkswagen AG s laskavou podporou kolegů z oddělení EEIZ/W.

4.1. ASPEKTY CERTIFIKAČNÍHO MĚŘENÍ

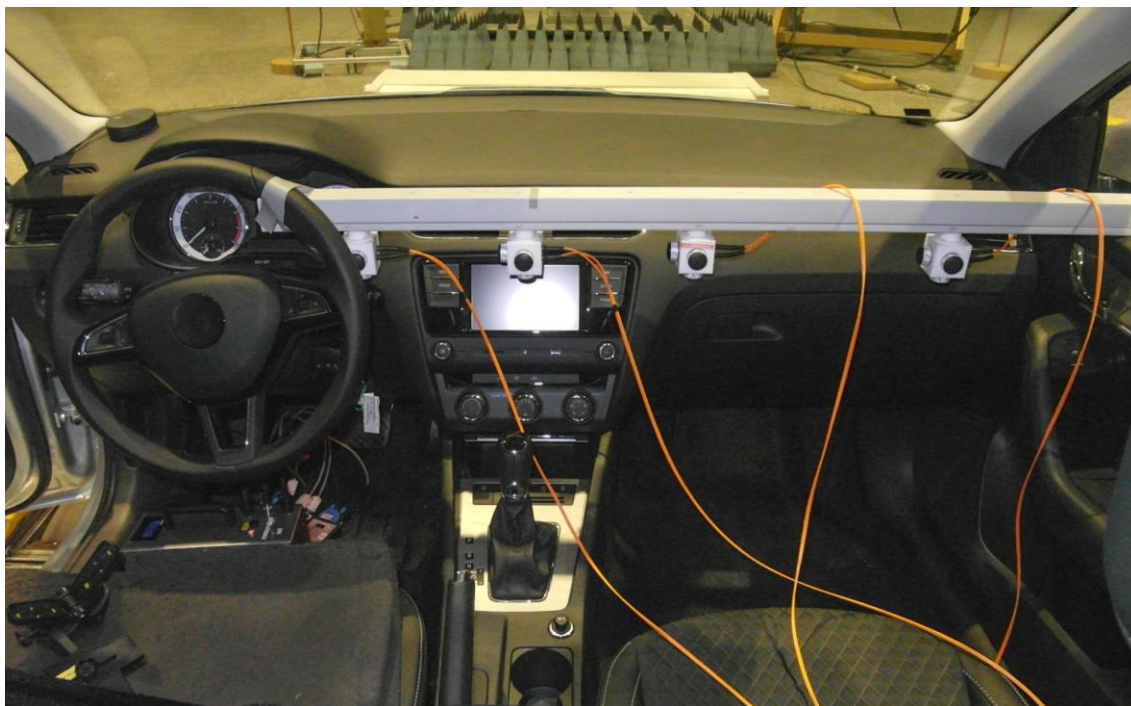
Certifikační měření bylo realizováno v plném souladu s normou ISO 11451-2 [13] používanou pro zkoušky odolnosti vozidel vůči vnějším elektromagnetickým polím. Stejně jako v případě numerických simulací a předcertifikačních měření byl zvolen rozsah zkoušených frekvencí od 30 do 220 MHz při konstantní intenzitě elektrického pole 30 V/m a vertikální i horizontální polarizaci. Vozidlo bylo zkoušeno pouze z čela. Konfiguraci testu je možno vidět na obrázku (Obr. 105).



Obr. 105 – Konfigurace zkoušky elektromagnetické odolnosti na certifikovaném pracovišti. Ilustrační fotografie.

Pro co největší míru porovnatelnosti s výsledky numerických simulací a předcertifikačních měření byla i v tomto případě ve voze vytyčena měřicí osa 1 a na ní stejným způsobem jako v předchozích případech 14 měřicích bodů. Vzhledem k tomu, že pracoviště disponuje maticí sond intenzity elektrického pole Dare!, byla osa vytyčena přímo plastovým nosníkem těchto sond, jak to ukazuje obrázek (Obr. 106). Pro účely porovnání měřených intenzit elektrického pole bylo měření realizováno na několika různých vozech v odlišných konfiguracích, viz kapitoly 4.2, 4.3. Byla rovněž zavedena nová měřicí osa x umístěná ve výšce displeje systému infotainmentu v podélné ose

vozidla tak, aby bylo možno kvantifikovat změny intenzity elektrického pole v prostoru předních sedadel. Umístění sond v měřicí ose x ukazuje obrázek (Obr. 107).

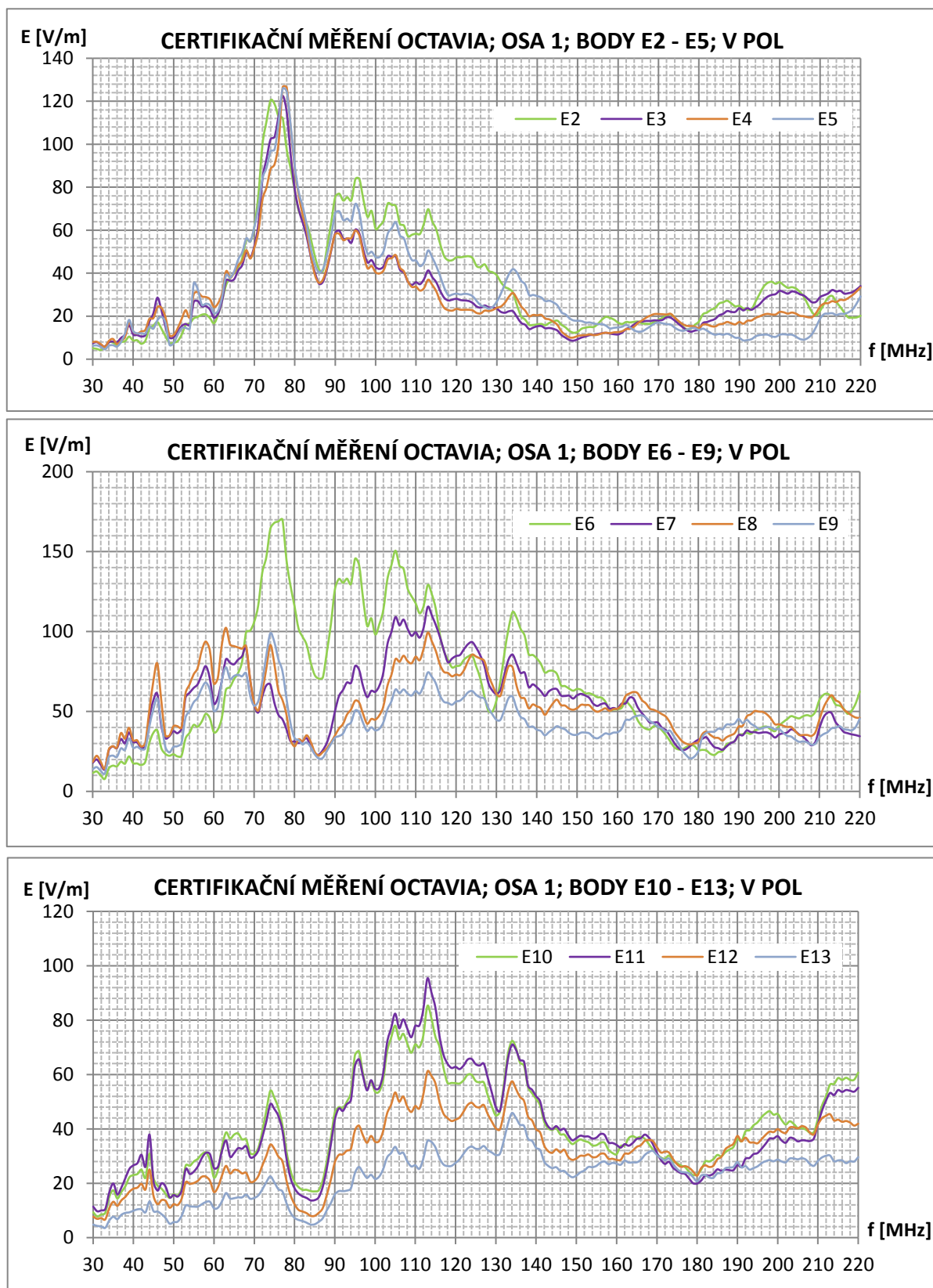


Obr. 106 – Způsob umístění sond intenzity elektrického pole Dare! v měřicí ose č. 1.

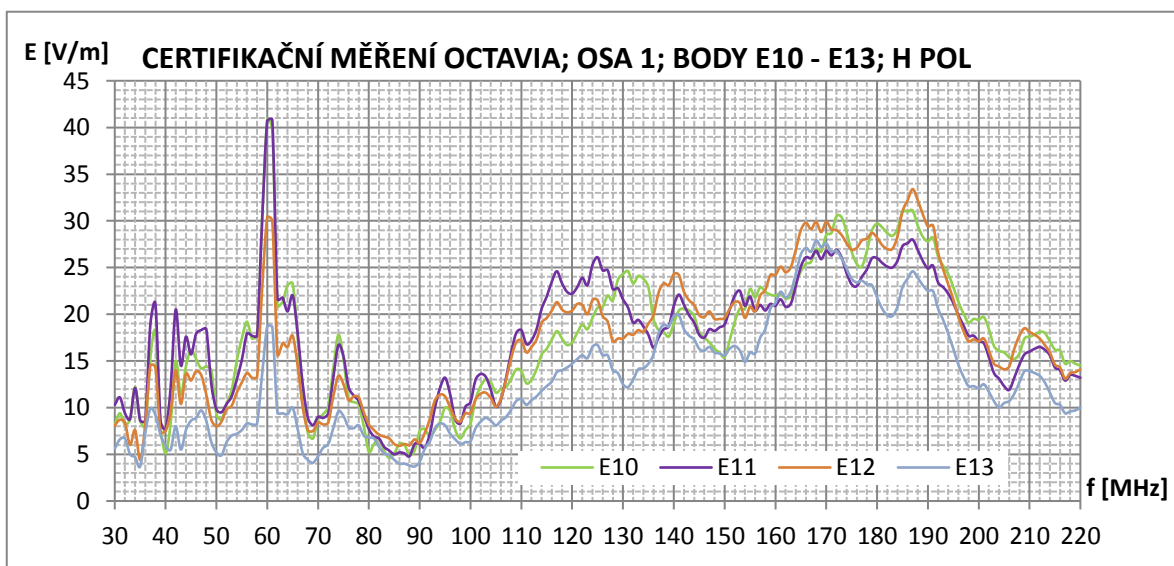
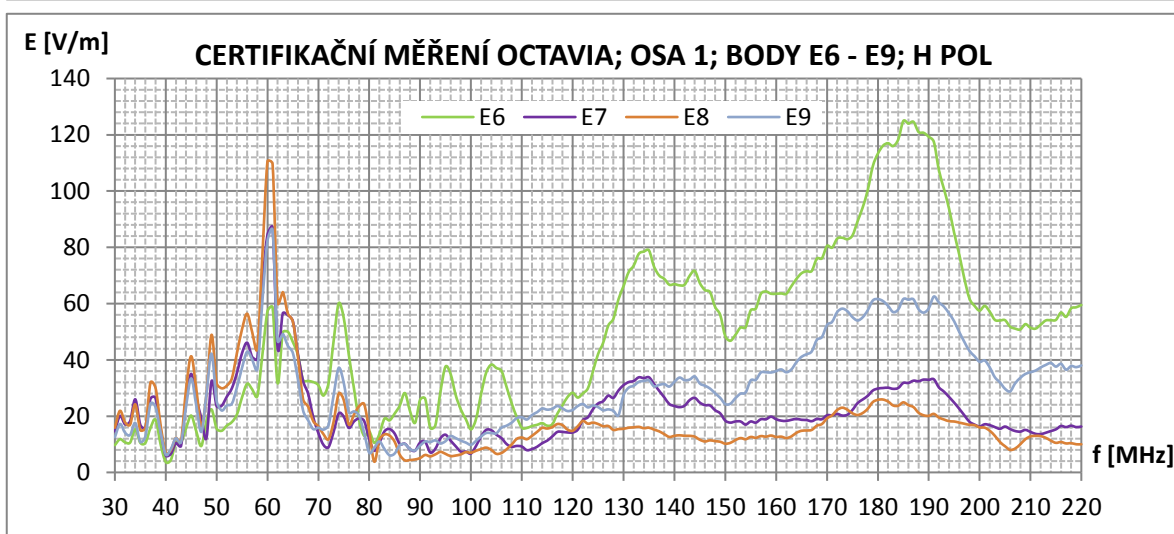
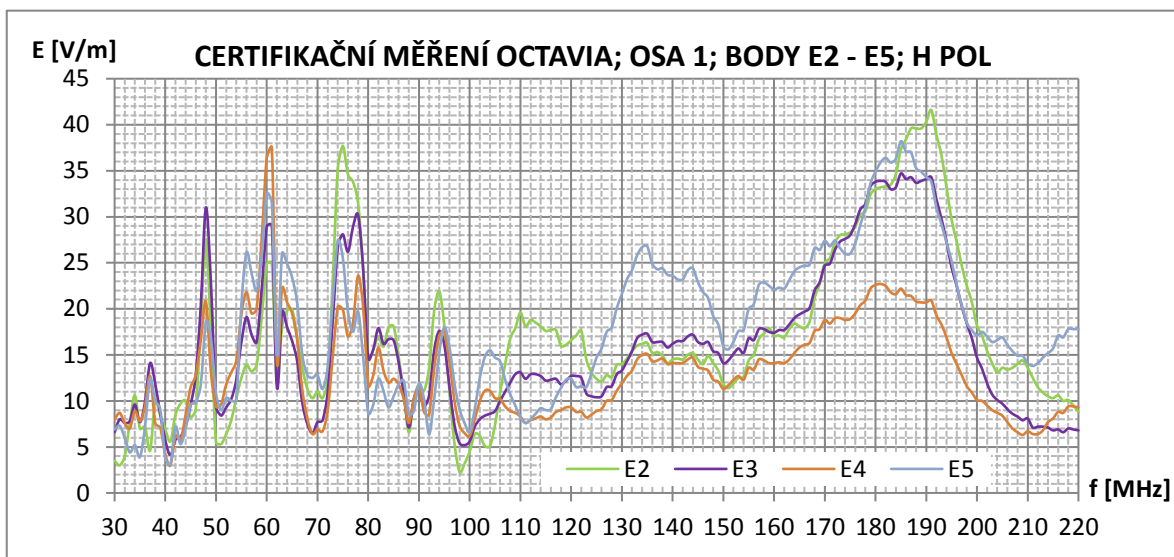


Obr. 107 – Způsob umístění sond intenzity elektrického pole Dare! v měřicí ose x.

4.2. VÝSLEDKY NAMĚŘENÉ NA VOZE ŠKODA OCTAVIA S PLNOU STŘECHOU



Obr. 108 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s plnou střechou. Certifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.



Obr. 109 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s plnou střechou. Certifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.

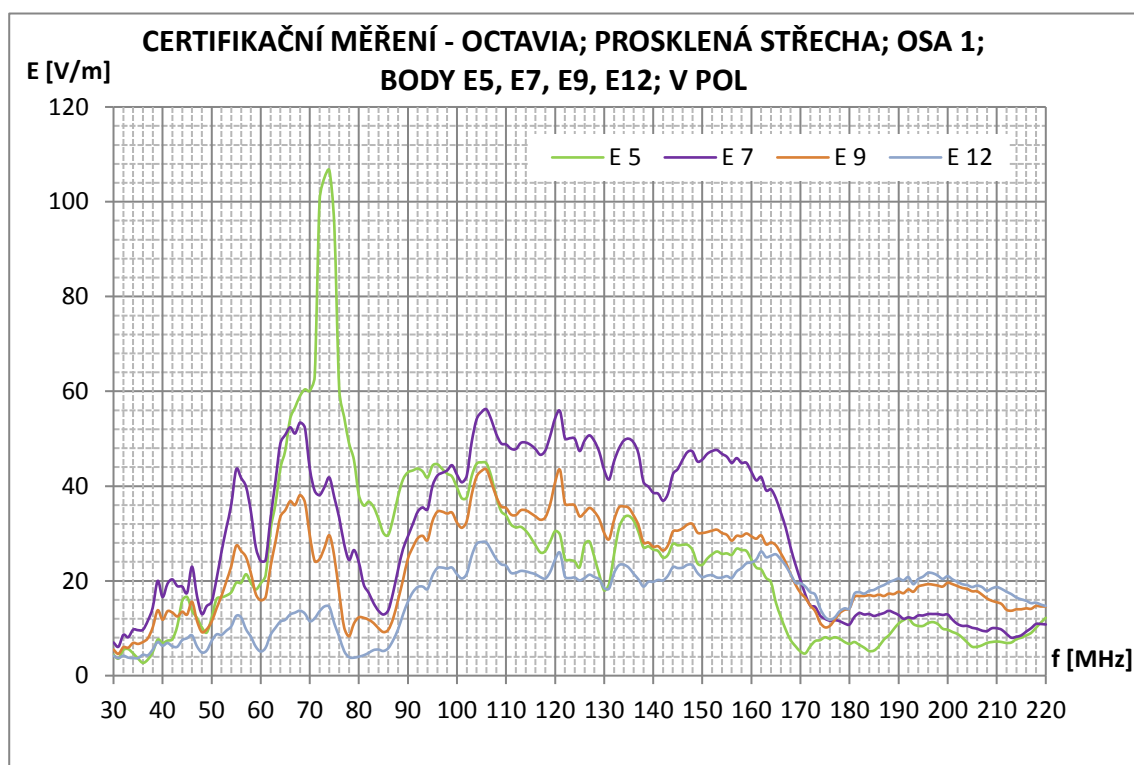
Výsledky prezentované v této kapitole jsou stěžejní pro porovnání výstupů numerických simulací a předcertifikačních měření prezentovaných v kapitole 5 této práce. Při expozici vertikálně polarizovanou vlnou (Obr. 108) můžeme vidět již známou rezonanční frekvenci 78 MHz, v tomto případě lokalizovanou v bodech E2 až E6. Maximální intenzita el. pole dosahuje 125 V/m. Naopak v bodech E7 – E13 není toto maximum příliš patrné, přičemž pokles intenzity je patrný směrem k bodu E14. Na frekvenci 105 – 115 MHz lze pozorovat široké frekvenční maximum lokalizované zejména do bodů E6, E7, E8, patrné je ovšem v celé ose 1. Naopak na vyšších frekvencích lokální nárůst intenzity pole nepozorujeme. Můžeme tedy říci, že nejvýznamnější rezonanční fenomény pozorujeme v blízkosti sloupku volantu, intenzita elektrického pole směrem k pravé části vozu významně slábne.

Při expozici horizontálně polarizovanou vlnou (Obr. 109) pozorujeme velmi výrazný pokles elektrického pole v karoserii vozu v její levé i pravé části, kde i maxima, lokalizovaná na frekvencích 61 MHz, 72-76 MHz a 175-195 MHz, dosahují nejvíce hodnot 40 V/m. Naopak ve střední části vozu (zejména body E6 a E8) dosáhla měřená intenzita elektrického pole hodnot až 120 V/m. Rovněž jsme zde zaznamenali velmi výrazné rozdíly intenzity v blízkých bodech – lokální maxima jsou tedy velmi ostře prostorově ohraničena.

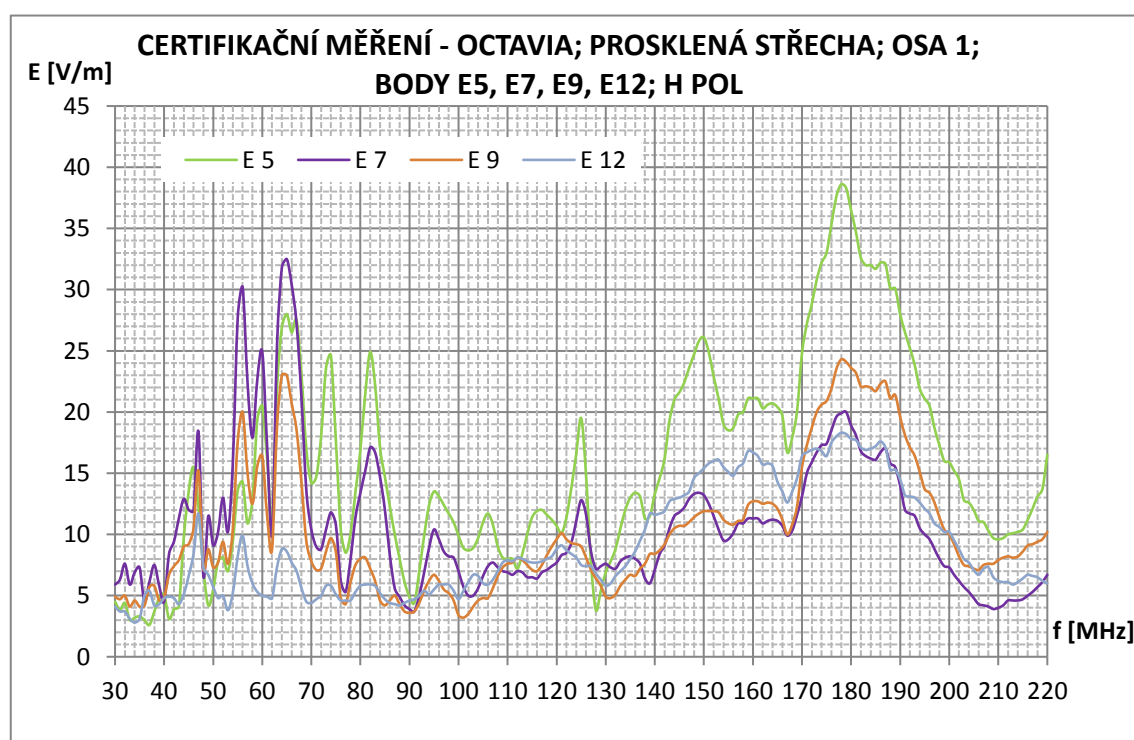
4.3. VÝSLEDKY NAMĚŘENÉ NA VOZE ŠKODA OCTAVIA S PROSKLENOU STŘECHOU

Pro analýzu rozložení maxim intenzity elektrického pole v rezonátoru s přidaným vazebním otvorem jsme provedli certifikační měření i na vozidle s prosklenou střechou, ve které fakticky chybí jedna stěna rezonátoru (její nahrazení pokoveným sklem střešní výplně nelze považovat za odpovídající stěnu rezonátoru). V důsledku této konfigurace dochází k podstatnému poklesu jakosti uvedené rezonanční dutiny a téměř k vymizení jejích vlastních rezonančních módů ve zkoumaném frekvenčním pásmu. Můžeme tak tyto výsledky s výhodou použít pro porovnání s předchozím měřením a snadněji tak určit, které fenomény, zaznamenané v kapitole 4.2, jsou způsobeny vlastními rezonančními módy dutiny, a které můžeme přičíst vlastní rezonanci dílů umístěných v karoserii. Výsledky zároveň poslouží k posouzení vlivu pevné střechy, respektive prosklené střechy vozidla na stínící účinnost karoserie jako celku.

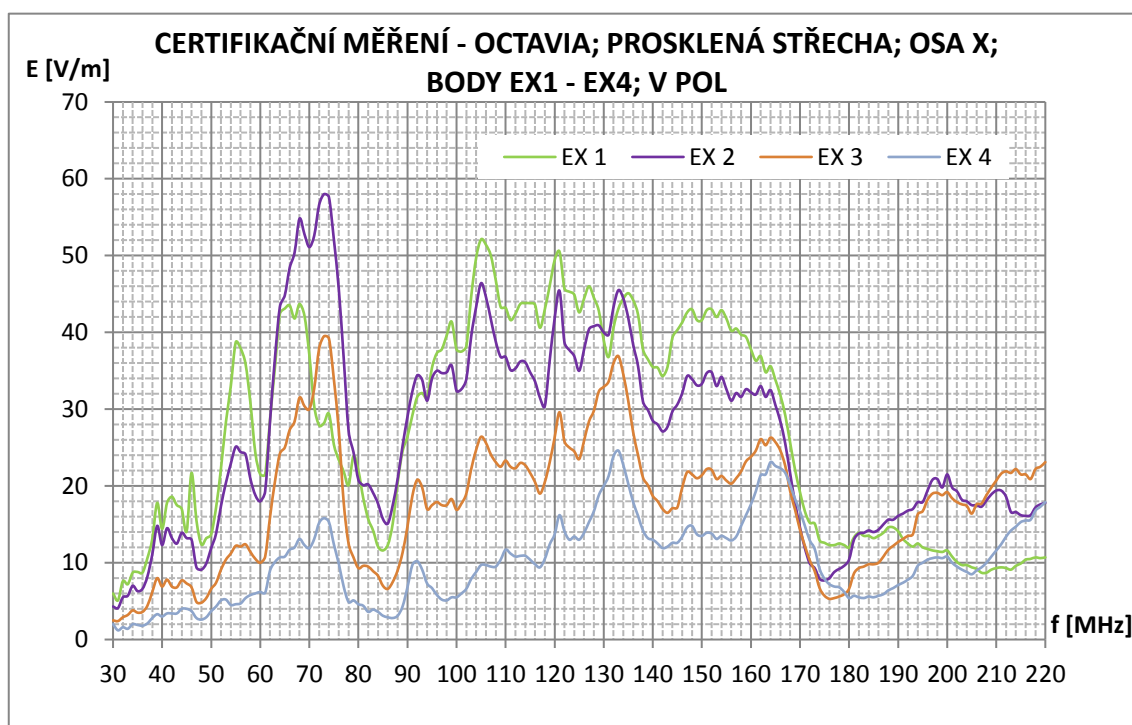
Pro zjednodušení popisu byla měření realizována pouze v bodech E5 (oblast sloupku řízení), E7 (střední část panelu infotainmentu), E9 (airbag spolujezdce) a E12 (pravá okrajová část vozu – výdech klimatizace). Doplnkem k měření v ose 1 je měření v ose x umožňující popis rozložení pole v prostoru mezi palubní deskou a předními sedadly v podélné ose vozidla. Předpokládáme, že toto měření ukáže, jakým způsobem se vyvíjejí maxima v karoserii bez blízké přítomnosti kovových prvků (výztuh a řídících jednotek).



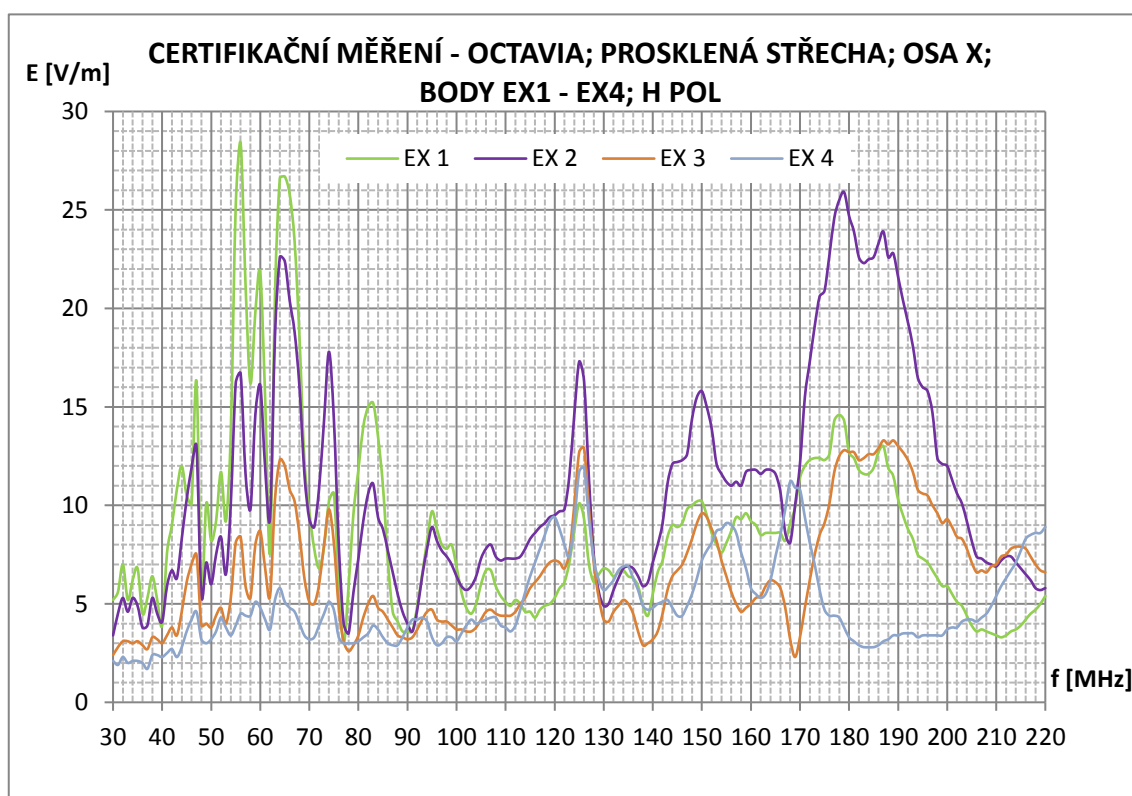
Obr. 110 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.



Obr. 111 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.



Obr. 112 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa x, vertikální polarizace.



Obr. 113 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa x, horizontální polarizace.

Z obrázku (Obr. 110) zobrazujícího frekvenční závislost intenzity elektrického pole při vertikální polarizaci zkušební pole jednoznačně vyplývá, že došlo k významnému utlumení veškerých rezonančních jevů pozorovaných na vozidle s plnou střechou s výjimkou frekvence 78 MHz úzce lokalizované do prostoru sloupku řízení. Je tedy zřejmé, že ostatní rezonanční fenomény, pozorované zejména na frekvencích 105 – 115 MHz a výše, jsou silně závislé na kvalitě rezonanční dutiny, ve které nastávají. Naopak maximum na frekvenci 78 MHz je způsobeno rezonancí dílčích prvků sloupku řízení a volantu, nezávisle na rezonanční dutině, ve které se tyto prvky nacházejí.

V případě horizontálně polarizovaného zkušební pole (Obr. 111) se výše uvedená zjištění potvrzují. Maxima je opět dosaženo v oblasti volantu, stejně jako v případě měření ve vozidle s plnou střechou na frekvenci 178 MHz. Tento rezonanční fenomén je nezávislý na kvalitě komplexní rezonanční dutiny, ale spíše na rezonanci jednotlivých prvků tuto soustavu tvořících.

Celková úroveň intenzity elektrického pole přes zkoušené frekvence v porovnání s vozidlem vybaveným plnou střechou poklesla v obou polarizacích zkušební pole o 20 – 30 V/m. Z toho vyplývá, že na daném frekvenčním rozsahu je pro volbu nejnáročnějšího testu (worst-case) vhodné volit variantu vozidla s plnou střechou, kterou doporučujeme i do základních doporučení pro provádění předcertifikačních zkoušek.

Data měřená v ose x na obrázcích (Obr. 112, Obr. 113) ukazují rozložení intenzity elektrického pole v podélné ose vozidla a poslouží k porovnání intenzit polí získaných v numerickém modelu.

5. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ A REÁLNÝCH MĚŘENÍ

Aby bylo možno vyjádřit míru spolehlivosti a vhodnosti navrhovaných předcertifikačních metod, je nezbytné provést důsledné porovnání výsledků získaných pomocí jednotlivých přístupů. Za tímto účelem provedeme pomocí FSV analýzy (diskutována v kapitole 1.4.3) objektivní porovnání tří základních sad získaných dat:

- 1) výsledků numerických simulací,
- 2) výsledků předcertifikačních měření na vystrojené karoserii,
- 3) výsledků certifikačních měření.

Ve všech sadách dat uvažujeme hodnoty získané v ose 1 a bodech E4, E7, E12 při expozici modelu, respektive vozidla, vertikálně i horizontálně polarizovaným zkušebním elektromagnetickým polem. Výše uvedené body byly zvoleny jako referenční z důvodu jejich dobré schopnosti popsat klíčové aspekty frekvenční závislosti intenzity elektrického pole v dané oblasti. Bod E4 reprezentuje rozložení intenzity elektrického pole v blízkosti sloupku řízení a volantu, tedy hlavního rezonančního prvku interiéru vozidla ve zkoumaném frekvenčním pásmu. Bod E7 umožňuje popis intenzity elektrického pole v oblasti displeje systému infotainmentu a představuje v podstatě střed vozidla v jeho podélné rovině. Poslední bod E12 reprezentuje hodnotu elektrického pole v pravé části interiéru, v místě airbagu spolujezdce. Každý z uvedených bodů je navíc umístěn u z elektrodynamického pohledu odlišné části palubní desky. Bod E4 je ze dvou stran obklopen kovovými výztuhami (výztuha palubní desky a sloupek řízení s volantem), bod E7 je umístěn v blízkosti chromového rámečku displeje infotainmentu a bod E12 leží u prosté plochy palubní desky (byť se pod jejím povrchem nachází patrona airbagu spolujezdce). Každý z těchto bodů tak může výhodně popsat odlišné fyzikální chování daného místa definované zvolenou numerickou či měřicí metodou.

Získané hodnoty FSV jsou pro všechny následující kapitoly utříděny dle stejného klíče. Horní skupina grafů na dané straně představuje výsledky FSV pro vertikální, spodní pak pro horizontální polarizaci zkušebního pole. Grafy ADMi, FDMi a GDMi ukazují absolutní hodnotu FSV (Tabulka 6) v závislosti na frekvenci. Je z nich tedy možno jednoduše vyčíst kvantitativní výši shody dvojice výsledků na dané frekvenci. Grafy ADMc, FDMc a GDMc pak ukazují míru výskytu dané třídy shody výsledků jednotlivých metod v daném parametru.

Tabulka 6 – Vyjádření měřítka FSV (doplněna pro přehlednost o třídu výsledku)

Hodnota FSV (kvantitativní)	FSV interpretace (kvalitativní)	Třída výsledku (class)
Méně než 0,1	„Excellent“	1
Mezi 0,1 a 0,2	„Very good“	2
Mezi 0,2 a 0,4	„Good“	3
Mezi 0,4 a 0,8	„Fair“	4
Mezi 0,8 a 1,6	„Poor“	5
Větší než 1,6	„Very poor“	6

Jako dobrý výsledek považujeme průměrnou hodnotu parametru ADM_{AV} , FDM_{AV} a GDM_{AV} nižší než 0,5, ačkoliv je zřejmé, že zejména v parametru GDM_{AV} popisujícím globální míru shody přes všechny body zkoumaného rozsahu bude dosažení této hranice velmi obtížné. Numerická simulace, jejíž výsledky budou postupně porovnány s výstupy ostatních měření, nemůže při zachování svého předcertifikačního účelu detailně popisovat veškeré aspekty způsobující posuv rezonančních frekvencí a intenzitu elektrického pole v nich měřenou, na což metoda FSV reaguje velmi citlivě. Na druhou stranu získáme velmi komplexní přehled, zdali je daná dvojice metod ve shodě ve všech sledovaných parametrech, nebo pouze v části z nich.

5.1. SROVNÁNÍ SHODY CERTIFIKAČNÍCH A PŘEDCERTIFIKAČNÍCH MĚŘENÍ

Míra shody certifikačních a předcertifikačních měření je velmi důležitým ukazatelem správné volby použité předcertifikační metodiky. Cílem navrhovaných předcertifikačních postupů měření bylo získat vypovídající zkušební metodiku realizovanou s minimalizovanými náklady v maximální možné shodě s výsledky certifikačních měření. Při pohledu na hodnoty FSV pro měřicí body E4, E7 a E12 (Obr. 114, Obr. 115, Obr. 116) a přehledovou tabulku (Tabulka 7) kvantitativní průměrné míry shody přes všechny porovnávané body můžeme konstatovat, že tento cíl byl splněn.

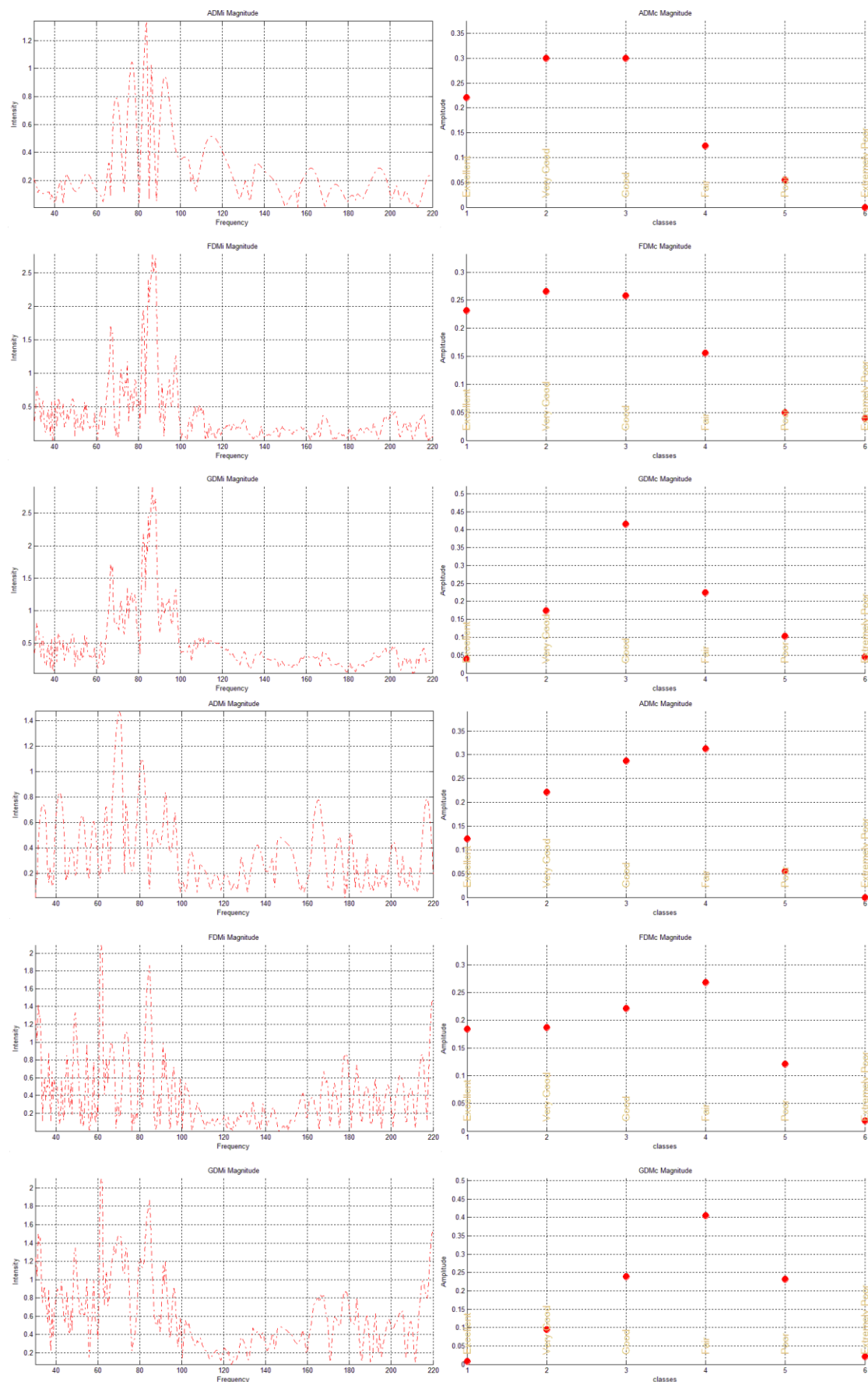
Průměr parametru ADM je $ADM_{AV} = 0,35$. Z grafů ADMi vyplývá, že velmi dobré shody obou měření bylo dosaženo zvláště v okrajových částech vozu (body E4 a E12). Nižší míru shody ve středu vozidla (bod E7) vysvětlujeme odlišnou vyzařovací charakteristikou použitých antén a z toho vyplývající mírně odlišnou uniformitou zkušebního pole. Velmi dobré shody parametrů amplitudy bylo dosaženo jak v maximech, tak i v ostatních frekvencích.

Parametr FDM dosáhl obdobné hodnoty $FDM_{AV} = 0,37$. Je z něj patrná opět dobrá shoda pozice a šířky rezonančních maxim. Dominantní frekvenci zůstává 78 MHz u obou měření, ovšem v případě předcertifikační zkoušky je maximum frekvenčně širší. Není zcela zřejmé, co je příčinou tohoto jevu. Nejpravděpodobnějším důvodem je vícecestné šíření vlny v případě předcertifikačního měření (nedokonalost měřicího pracoviště), která působí rezonanci odlišných prvků než na frekvenci 78 MHz.

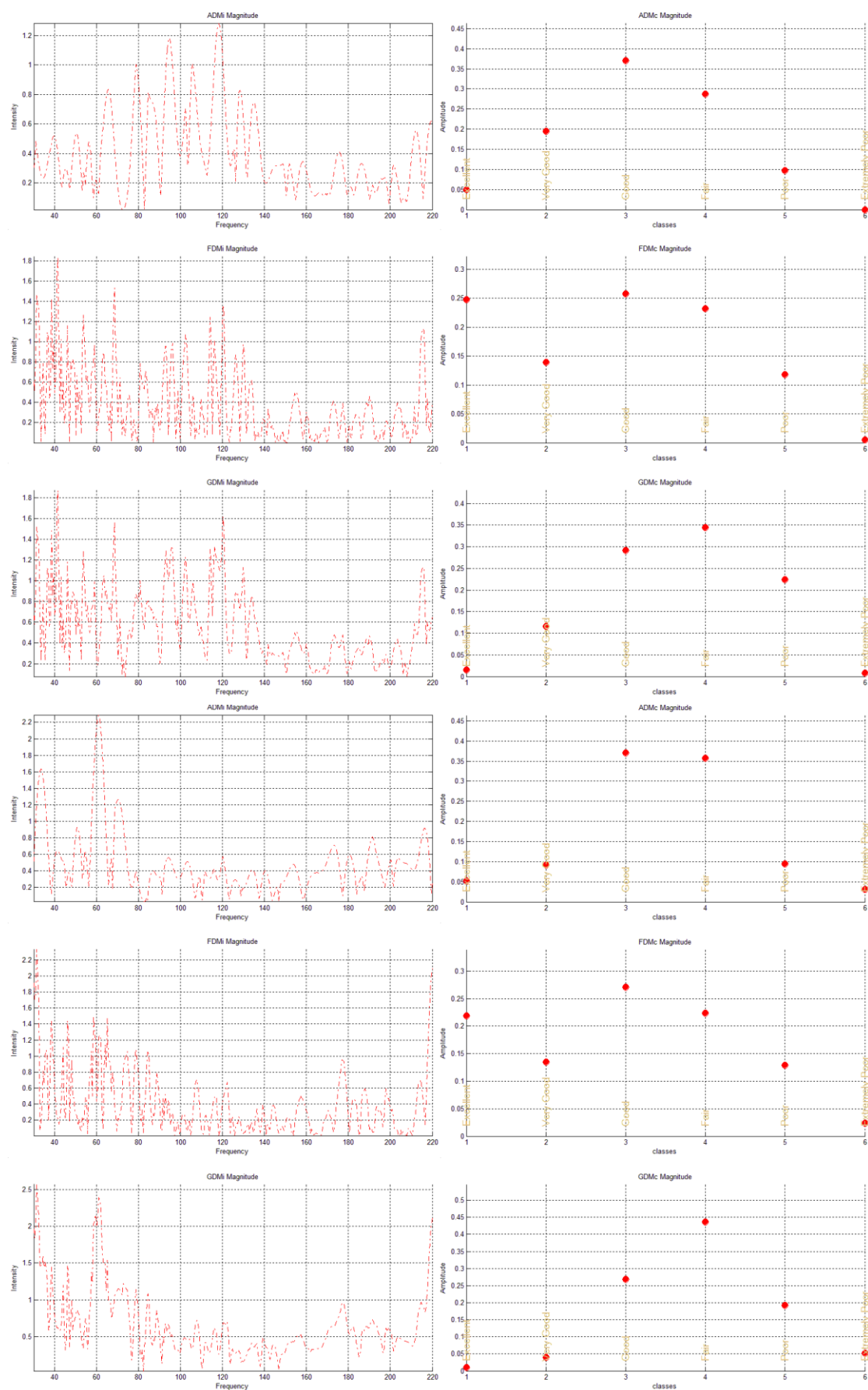
Tabulka 7 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x vystrojená karoserie

měřicí bod / parametr	E4 V	E4 H	E7 V	E7 H	E12 V	E12 H	parametr celkově
ADM_{AV}	0,26	0,36	0,40	0,49	0,24	0,32	0,35
FDM_{AV}	0,35	0,41	0,38	0,41	0,33	0,33	0,37
GDM_{AV}	0,48	0,60	0,56	0,66	0,45	0,50	0,54

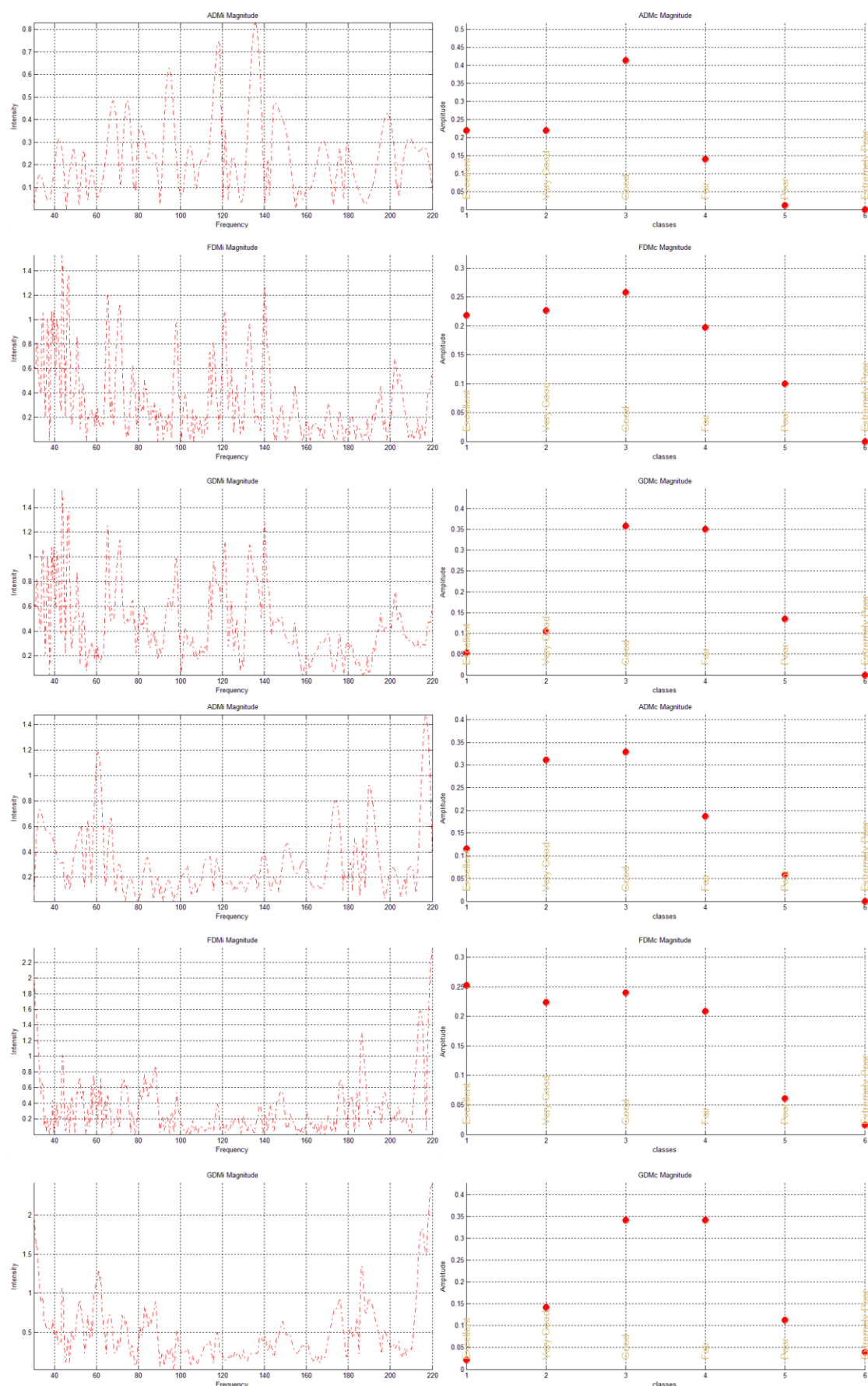
Míra celkové shody výsledků obou metod GDM dosáhla hodnoty $GDM_{AV} = 0,54$. Z toho vyplývá vysoká globální shoda výsledků předcertifikačního a certifikačního měření jak v oblasti amplitud, tak i frekvenčních fenoménů. Na tomto základě se domníváme, že zvolená metodika předcertifikačních testů je správná a dokáže za omezených podmínek předcertifikační zkoušky dosáhnout srovnatelných výsledků jako zkouška certifikační.



Obr. 114 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E4.



Obr. 115 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E7.



Obr. 116 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E12.

5.2. SROVNÁNÍ SHODY VÝSLEDKŮ NUMERICKÝCH SIMULACÍ S PŘEDCERTIFIKAČNÍMI TESTY NA VYSTROJENÉ KAROSERII VOZU

Vyjádření míry shody mezi výsledky numerické simulace a předcertifikačním měřením na vystrojené karoserii nabízí přímý pohled na navrhované předcertifikační metody. Numerický model zkoumaného problému byl co nejvíce přizpůsoben zde porovnávanému předcertifikačnímu měření na vystrojené karoserii včetně kalibrace zkušební intenzity elektrického pole. Vzhledem k tomu očekáváme dobrou míru shody ve všech sledovaných parametrech.

Výsledky FSV pro měřicí body E4, E7 a E12 můžeme pozorovat na obrázcích (Obr. 117, Obr. 118, Obr. 119). Přehledovou kvantitativní průměrnou míru shody přes všechny porovnávané body pak ukazuje přehledová tabulka (Tabulka 8). Hodnoty nižší než stanovená hranice shody 0,5 jsou v tabulce vyznačeny zeleně. Můžeme si všimnout, že bylo dosaženo velmi dobré míry shody obou navrhovaných předcertifikačních metod, a to zejména při vertikální polarizaci testovacího pole. Je patrné, že navržená numerická simulace provedená dle zásad uvedených v kapitole 2.6.1 dosahuje dobré shody výsledků s předcertifikačním měřením zejména v parametru ADM_{AV} . Průměrná hodnota přes všechny měřené body a polarizace $ADM_{AV} = 0,38$. Tohoto výsledku se podařilo dosáhnout zejména vhodným nastavením parametrů simulačního modelu vozidla. V modelu jsou použity dominantní rezonanční prvky vnitřní výbavy (výztuha palubní desky a konstrukce sedadel) se správnou volbou lokálního zjemnění sítě (sub-mesh) na prvcích vnitřních výztuh a hranách karoserie.

Tabulka 8 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x vystrojená karoserie

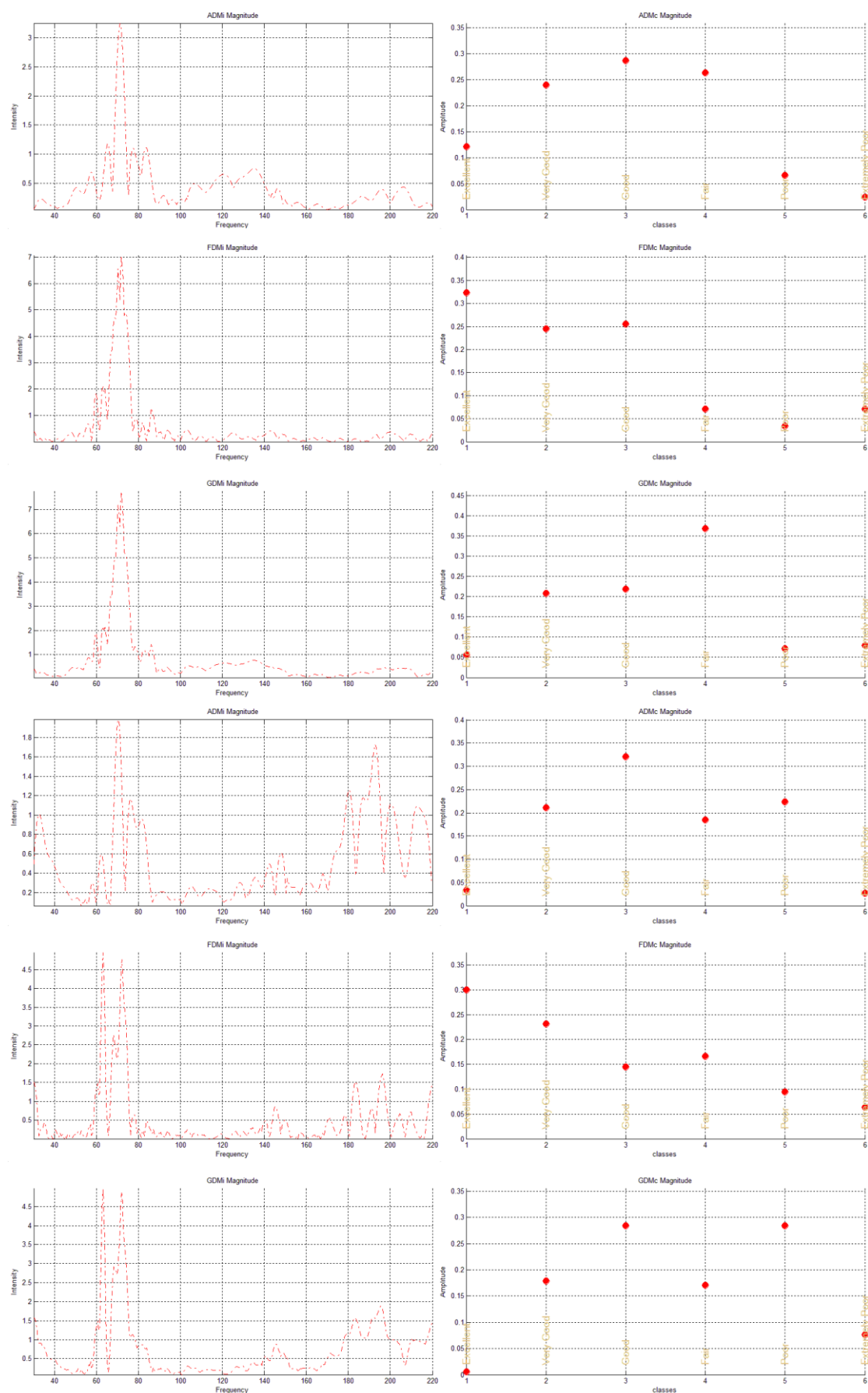
měřicí bod / parametr	E4 V	E4 H	E7 V	E7 H	E12 V	E12 H	parametr celkově
ADM_{AV}	0,41	0,51	0,37	0,31	0,37	0,31	0,38
FDM_{AV}	0,49	0,48	0,49	0,46	0,49	0,46	0,48
GDM_{AV}	0,70	0,74	0,67	0,58	0,68	0,58	0,66

Z průběhů ADM_i je patrné, že největší rozdíly mezi velikostí amplitudy získané pomocí numerické simulace a měření se nacházejí v pozici velmi úzkých frekvenčních maxim (absolutní rozdíl $|E| = 320 \text{ V/m}$ v bodě E4, vertikální polarizace). Naopak mimo tato maxima jsou hodnoty ve velmi dobré shodě, ačkoliv pozorujeme obecně vyšší hodnotu intenzity získanou pomocí numerické simulace. Tato skutečnost je dána modelováním karoserie jako perfektního elektrického vodiče oproti měření v reálné karoserii tvořené ztrátovým materiálem. Bylo by proto možno pro zvýšení přesnosti výpočtu uvažovat materiálově diferencovaný popis částí karoserie tvořené různými druhy ocelí. Je rovněž zřejmé, že dobré výsledky numerická simulace podala spíše při vertikální polarizaci, kdy jsou příspěvky frekvenčních maxim vzhledem k tvaru dutiny dány zejména vlastními rezonančními módy karoserie. V případě horizontální polarizace je tato shoda menší, neboť zejména ke konci frekvenčního pásma v bodech E6 – E9 numerická simulace identifikuje maxima, která se v případě měření nevyskytují. Tento rozdíl si vysvětlujeme odlišným popisem povrchových proudů v oblasti výztuhy displeje systému infotainmentu, čemuž odpovídá i popis bodů, kde k majoritnímu rozdílu intenzit dochází.

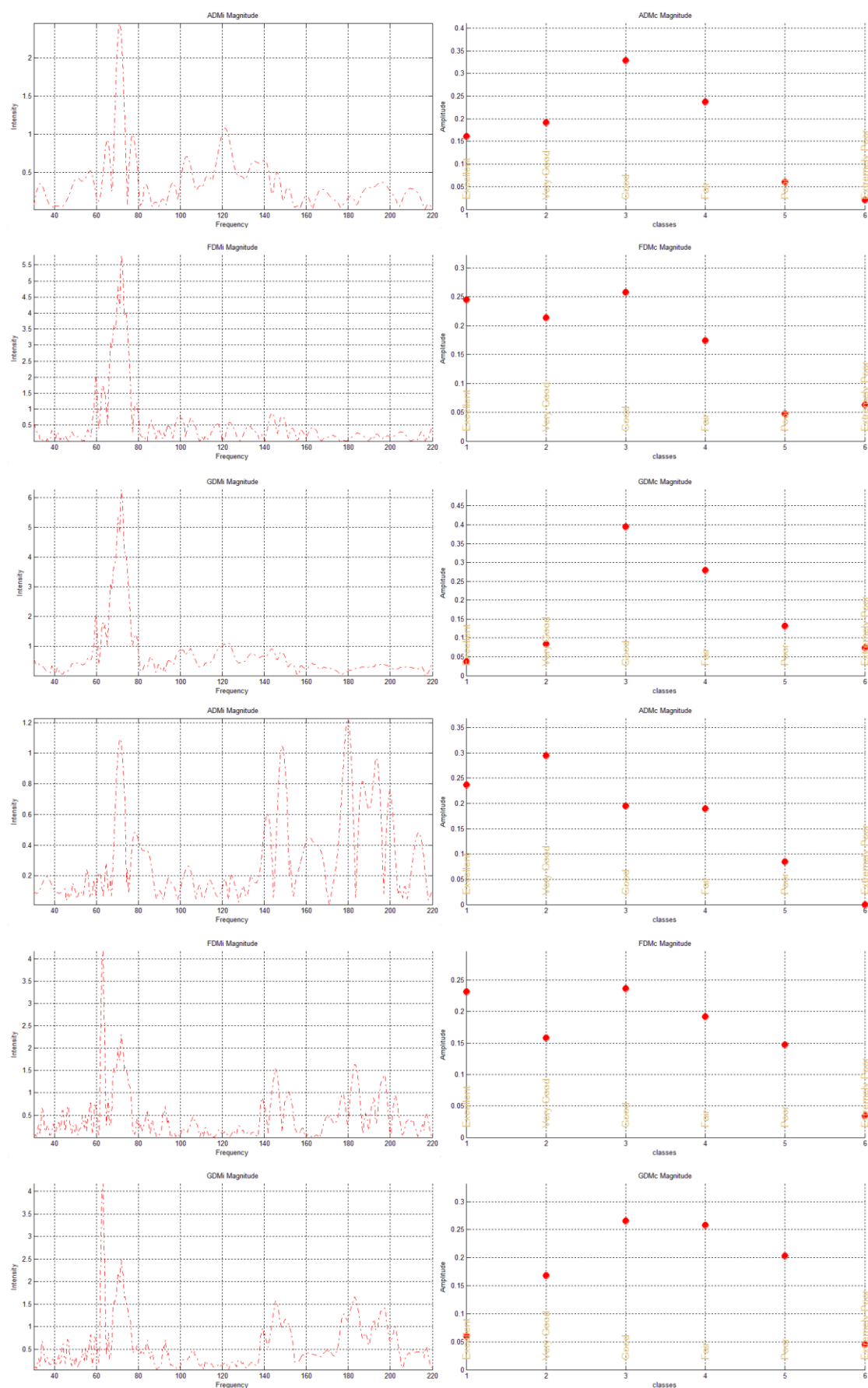
Míra shody frekvenčních fenoménů FDM_{AV} dosahuje opět dobrých výsledků, kdy její průměrná hodnota přes všechny měřené body a polarizace $FDM_{AV} = 0,48$. Rozdíly mezi jednotlivými polarizacemi nejsou v míře shody patrné. V případě vertikální polarizace jsou tvary dominantních frekvenčních maxim ve velmi vysoké shodě, avšak jejich pozice není oběma metodami lokalizována shodně. Dominantní rezonanční maximum v oblasti 70 MHz je pomocí numerických metod lokalizováno na 72 MHz, naopak měřením na 78 MHz. Víme, že toto maximum je způsobeno rezonancí částí výztuhy sloupku řízení a volantu a je patrné zejména v bodě E4. Proto považujeme za hlavní příčinu tohoto frekvenčního rozdílu omezenou možnost diskretizace drobných součástí tvořících tuto sestavu, která byla v numerickém modelu dle pravidel modelována jediným dílem, což způsobí při vybuzení odlišných délek vodivých prvků posun jejich rezonanční frekvence. Naopak na frekvenci 120 MHz, dané zejména rezonancí prvků výztuhy střední konzoly jsou obě metody ve velmi dobré shodě. Tato část vozu je tvořena prvky o velikosti, kterou lze bez potíží modelovat, a proto nejsou rezonanční délky pro obě metody odlišné.

Celková míra shody GDM_{AV} nedosahuje v žádném z bodů požadované hranice 0,5. Hlavní příčinu spatřujeme ve skutečnosti, že použitá numerická metoda a nastavení simulačního modelu obsahují vědomé nedostatky dané ovšem charakteristikou předcertifikační zkoušky. Je zřejmé, že by bylo možno připravit model natolik dokonalý (zejména velikost prvků diskretizační sítě a velmi podrobný materiálový popis jednotlivých částí karoserie), který by umožnil zvýšit míru shody na úroveň $GDM_{AV} \leq 0,5$. Zůstává ovšem otázkou, zda by se stále jednalo o model použitelný pro předcertifikační zkoušky. Z praktických poznatků získaných při použití aktuálního modelu víme, že doba výpočtu lineárně stoupá s počtem použitých prvků modelu navíc s přihlédnutím k materiálovému popisu. Doba přípravy takového modelu by se stala neúměrnou, stejně jako doba nutná pro výpočet. Považujeme proto dosažené výsledky za vyhovující zejména z pohledu identifikace rizikových frekvenčních pásem a orientační znalosti intenzit polí v těchto maximech dosažených.

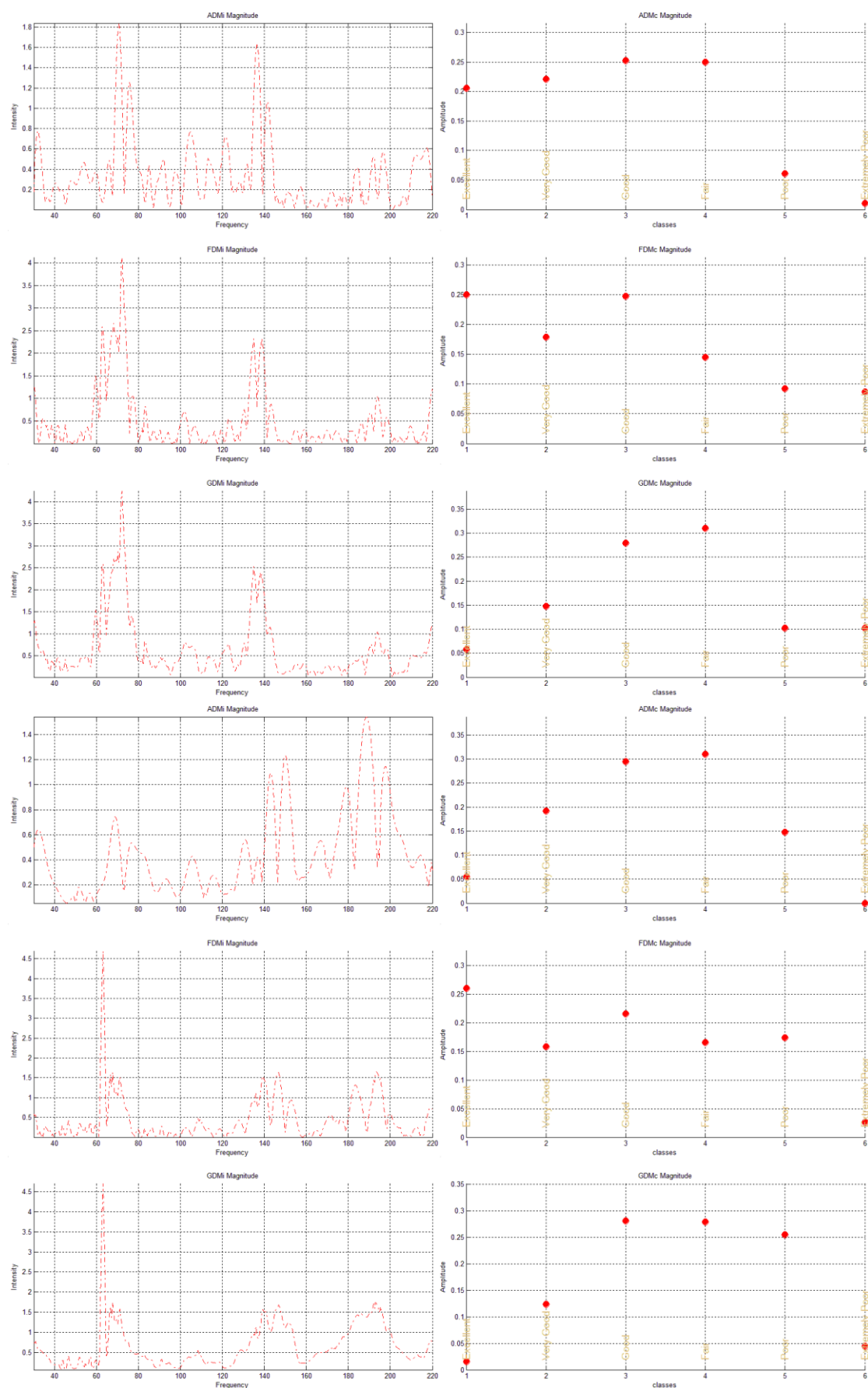
Domníváme se, že přístup k numerickému modelu a měření na vystrojené karoserii byl zvolen správně. Obě techniky nabízejí velmi dobrý pohled na reálné rozložení frekvenčních maxim lokalizovaných v karoserii s dobrou mírou shody. Doporučujeme proto použití obou zmíněných přístupů v rámci předcertifikačních zkoušek.



Obr. 117 - FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E4.



Obr. 118 - FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E7.



Obr. 119 - FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E12.

5.3. SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÝCH SIMULACÍ S CERTIFIKAČNÍMI TESTY

Posledním provedeným porovnáním je míra shody mezi výstupy numerické simulace a certifikačním měřením. Získané výsledky (Obr. 120, Obr. 121, Obr. 122) dobře popisují odlišnosti obou typů přístupů k získání informací o distribuci elektrického pole v karoserii. Souhrn jednotlivých parametrů ve zkušebních bodech ukazuje přehledová tabulka (Tabulka 9).

Nejvyšší míry shody bylo dosaženo v parametru ADM s hodnotou $ADM_{AV} = 0,44$, což považujeme za velmi dobrý výsledek. Rozdíly byly zaznamenány zejména v oblasti dominantního rezonančního kmitočtu 78 MHz, avšak i mimo něj byl patrný nárůst intenzity elektrického pole získané pomocí numerické simulace. Významný vliv na celkovou stínící účinnost karoserie a z toho plynoucí odlišnou intenzitu elektrického pole v rezonanci i mimo ni mají pokovené skleněné výplně vozidla. Vzhledem k tomu, že u numerického modelu tyto výplně neuvažujeme, je zřejmé, že intenzita elektrického pole u tohoto modelu bude dosahovat mnohem vyšších hodnot než u reálného certifikačního měření. Značný vliv na nárůst simulované intenzity elektrického pole má i vysoká jakost rezonanční dutiny popsána dále.

Tabulka 9 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x certifikační měření

měřicí bod / parametr	E4 V	E4 H	E7 V	E7 H	E12 V	E12 H	parametr celkově
ADM_{AV}	0,35	0,47	0,45	0,50	0,38	0,46	0,44
FDM_{AV}	0,47	0,48	0,51	0,51	0,53	0,52	0,51
GDM_{AV}	0,67	0,79	0,75	0,8	0,71	0,72	0,74

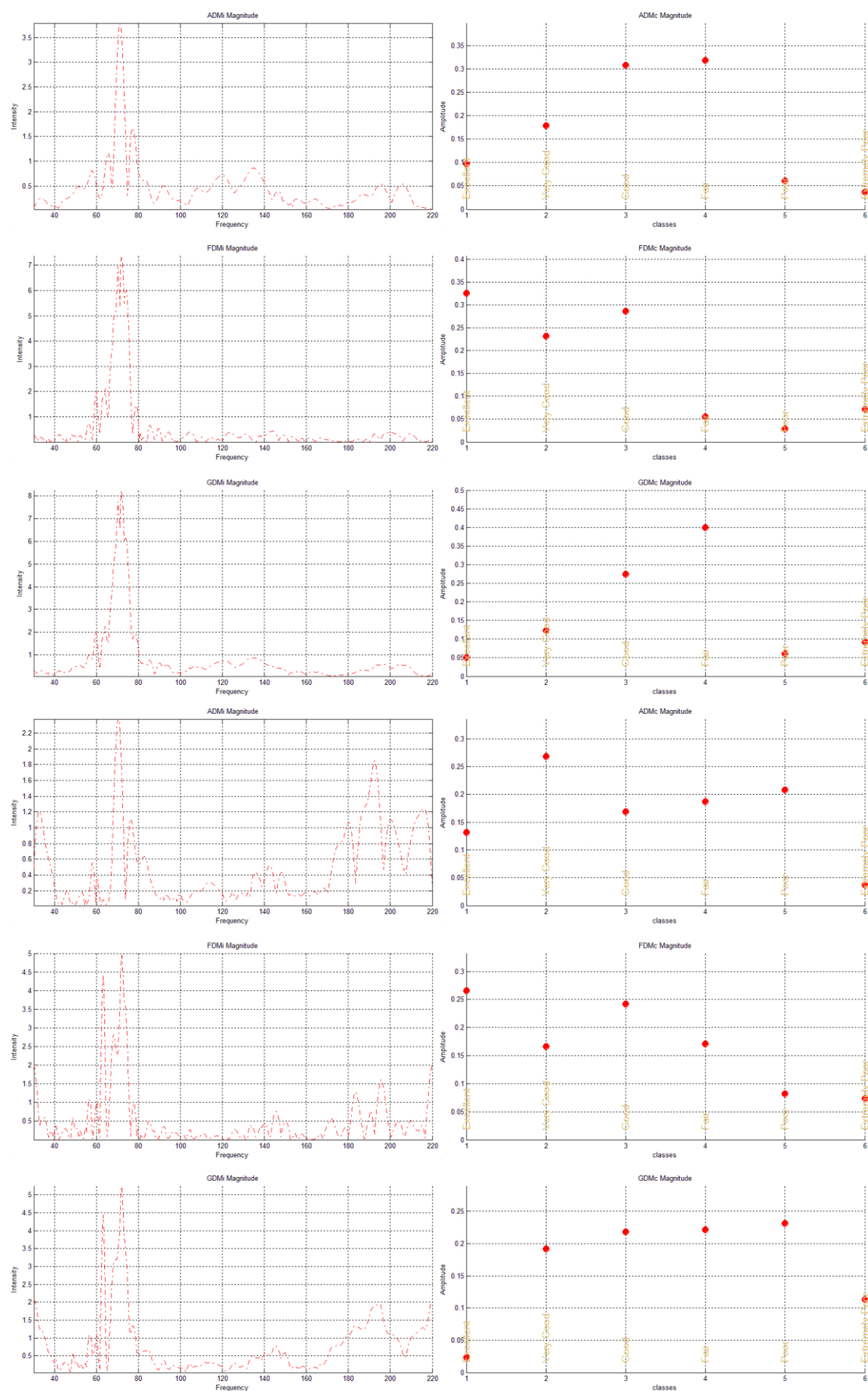
Parametr FDM dosáhl hodnoty $FDM_{AV} = 0,51$. Příčinu této výše shody spatřujeme zejména v úzké lokalizaci frekvenčního maxima 78 MHz do bodu E4 při certifikačním měření, zatímco v případě numerické simulace je toto maximum patrné ve všech zkoumaných bodech. Rovněž byla v případě dominantního rezonančního kmitočtu zaznamenána odlišná šířka pásma tohoto jevu. Stejně jako u parametru ADM je i zde šířka rezonančních maxim následkem odlišné jakosti rezonanční dutiny. Zatímco v případě numerické simulace uvažujeme rezonanční dutinu a její dominantní výbavu jako ideální, v případě reálného měření dochází k významnému poklesu jakosti této dutiny z důvodu přítomnosti materiálů tvořících výplně a potahy interiéru. Zaznamenali jsme rovněž posun rezonančního maxima z frekvence 78 MHz na 72 MHz v případě numerické simulace. Víme, že toto maximum je způsobeno rezonancí částí výtuhy sloupku řízení a volantu a je patrné zejména v bodě E4. Proto považujeme za hlavní příčinu tohoto frekvenčního rozdílu omezenou možnost diskretizace drobných součástí tvořících tuto sestavu, která byla v numerickém modelu dle pravidel modelována jediným dílem, což způsobí při vybuzení odlišných délek vodivých prvků posun jejich rezonanční frekvence.

Celková míra shody vyjádřená parametrem GDM dosahuje průměrné hodnoty $GDM_{AV} = 0,74$, což je ze souboru porovnávaných dat nejnižší dosažená míra. I přesto ale považujeme tento výsledek za dobrý, neboť jednotlivé separátně porovnávané parametry ADM a GDM dosáhly výborných výsledků. Největší rozdíly dle průběhu GDM_i můžeme

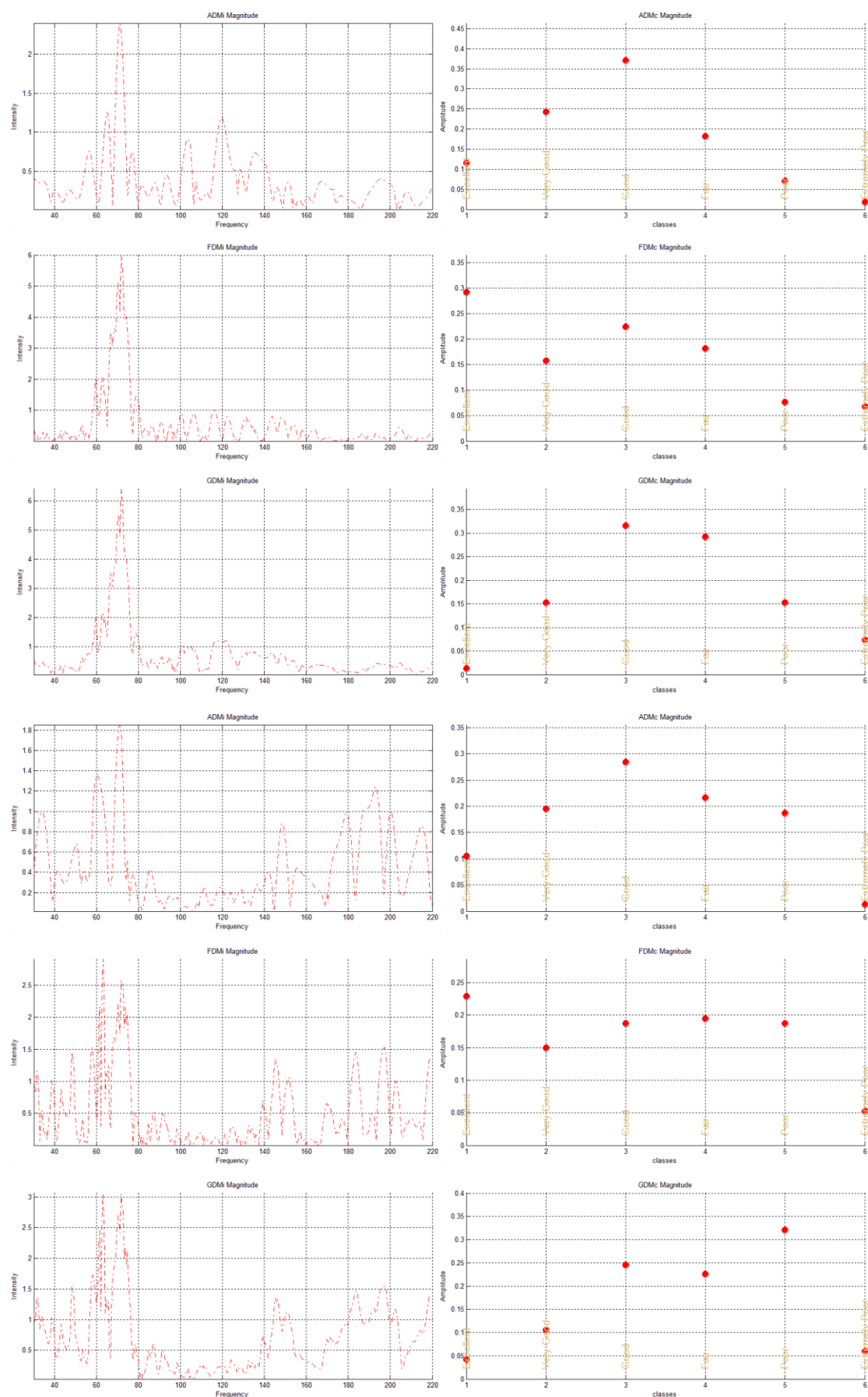
pozorovat nejčastěji v oblastech rezonančních maxim (zejména 78 MHz pro vertikální i horizontální polarizaci), zatímco v případě ostatních frekvencí je celková míra shody velmi dobrá. V případě předcertifikačních zkoušek není ale tato neshoda z praktického hlediska významná, neboť jejich cílem je definovat přibližnou pozici a intenzitu maxima, nikoliv vyjádřit jeho exaktní hodnotu.

Ačkoliv je metodika přípravy simulačního modelu a parametrů simulace nastavena tak, aby se výsledkům certifikačních zkoušek co nejvíce přiblížila, není možné simulaci provést takovým způsobem, aby její výsledky s certifikačním měřením zcela korespondovaly. Hlavní příčiny vidíme zejména ve zjednodušeném popisu simulačního modelu. V numerické simulaci uvažujeme dominantní prvky mající vliv na distribuci elektrického pole v karoserii (tvar rezonanční dutiny, výztuhy palubní desky a sedadel). Oproti tomu se při certifikačním měření uplatňuje řada dalších vlivů. Mezi nejvýznamnější patří přítomnost komplexních kabelových svazků v karoserii, řídících jednotek, pokovených rámečků v interiéru a skleněných výplní. Při zanedbání těchto dílů v předcertifikační simulaci sice ztratíme detailní popis všech maxim vyskytujících se v karoserii, ale umožní nám to provést takovou simulaci dostatečně pružně vůči vývojovému cyklu vozidla, a přesto získat odpovídající popis vnitřního elektromagnetického prostředí. Díky tomu je možné včas přijmout opatření¹⁰ pro co nejvýhodnější rozmístění jednotlivých elektronických jednotek ve voze, což je jedním z hlavních cílů této práce. Orientační znalost kritických míst v karoserii nám totiž umožní ohrožené jednotky přesunout do jiných zástavbových pozic, či alespoň přijmout dodatečná opatření vedoucí k jejich spolehlivé funkci i v místě s lokálně zvýšenou intenzitou elektrického pole.

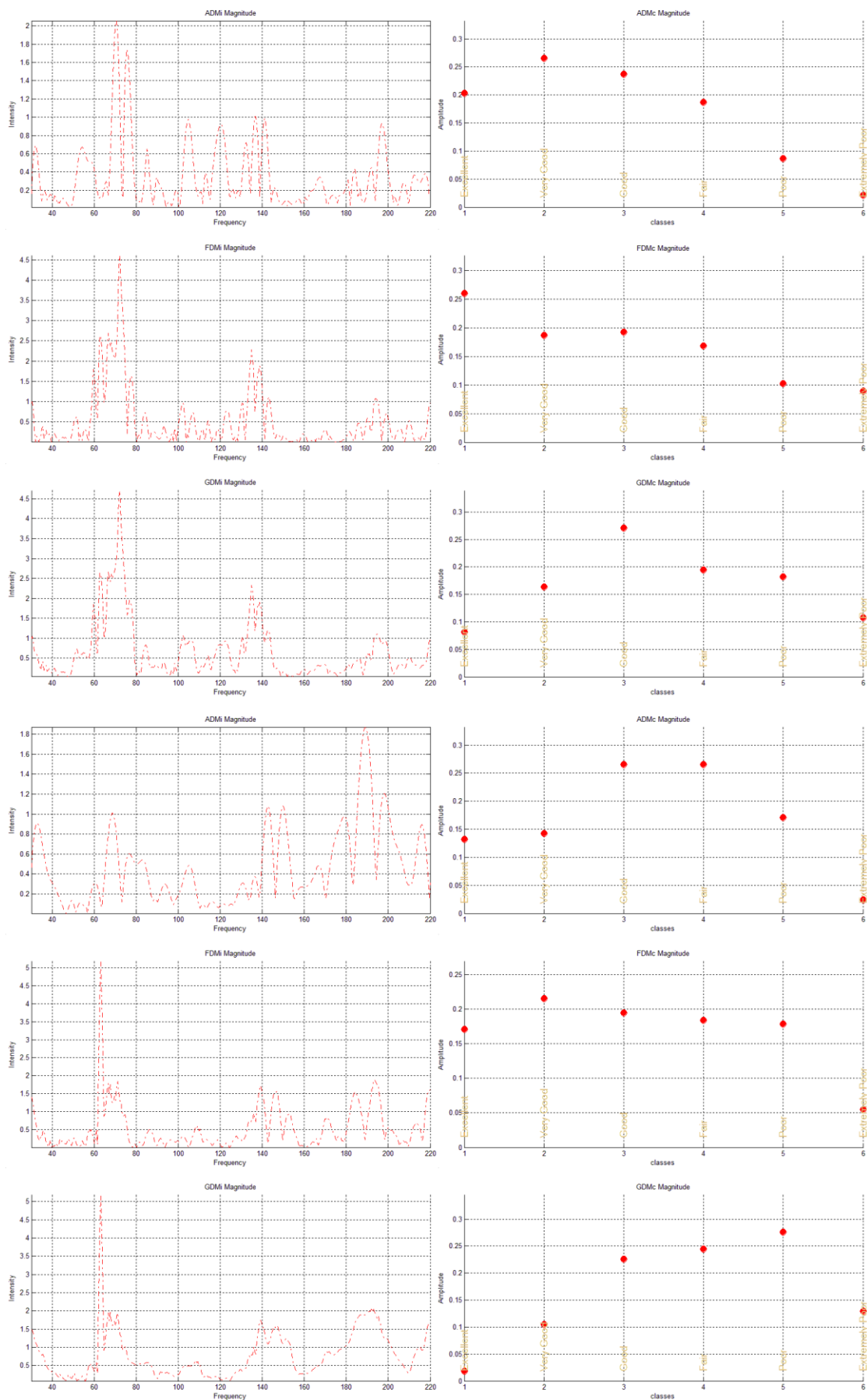
¹⁰ Vzhledem k relativně krátkému vývojovému cyklu vozidla z pohledu EMC je nutné provádět změny v umístění řídících jednotek a kabelových svazků ještě před stavbou prvních fyzických prototypů vozu.



Obr. 120 - FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E4.



Obr. 121 - FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E7.



Obr. 122 - FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E12.

5.4. NAVRHOVANÁ OPATŘENÍ PRO PŘEDCERTIFIKAČNÍ TESTY

V této práci jsme se zabývali dvěma možnými způsoby provádění předcertifikačních testů: numerickými simulacemi a předcertifikačním měřením. Ukázalo se, že oba přístupy mohou být velmi dobrým ekvivalentem ke zkouškám certifikačním, zvláště pokud použijeme kombinaci obou zmíněných metod. Na základě poznatků prezentovaných v předchozích kapitolách navrhuje následující klíčová doporučení pro realizaci předcertifikačních zkoušek elektromagnetické odolnosti.

5.4.1. OBECNĚ PLATNÁ PRAVIDLA

První skupinou jsou pravidla pro obecné provádění předcertifikačních zkoušek odolnosti vůči elektromagnetickým polím.

- 1) Předcertifikační zkoušky elektromagnetické odolnosti můžeme provádět pomocí numerických simulací, nebo pomocí předcertifikačních měření založených na modifikovaných metodách. Ideální variantou je kombinace obou zmíněných přístupů, výhodná zejména pro vzájemnou verifikaci získaných dat.
- 2) Na základě poznatků o výši intenzit elektrických polí získaných pomocí numerických simulací, předcertifikačních, i certifikačních měření, doporučujeme následující minimální limity odolnosti komponent vůči vnějšímu elektromagnetickému poli:
 - a) 30 – 60 MHz – 70 V/m,
 - b) 60 – 100 MHz – 200 V/m,
 - c) 100 – 220 MHz – 70 V/m.

Doporučujeme tuto mez návrhu respektovat zejména u bezpečnostně relevantních dílů a dílů IBK¹¹ nacházejících se v interiéru vozidla.

5.4.2. DOPORUČENÍ PRO PROVÁDĚNÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Dle poznatků získaných při realizaci této práce stanovujeme následující řadu doporučení pro co nejefektivnější provádění komplexních numerických simulací vozidla z pohledu odolnosti vůči vnějšímu poli.

- 1) Určení oblasti zkoumání. Základní témata umožňující získat celkový přehled nad chováním vozidla z hlediska elektromagnetické odolnosti tvoří:
 - 1) analýza vnitřního prostředí karoserie, včetně modální analýzy,
 - 2) analýza chování kabelových svazků,
 - 3) analýza zemního konceptu vozidla,
 - 4) analýza anténních prvků.
- 2) Volba vhodného nástroje a numerické metody pro řešení vybraného problému. Orientačně se můžeme řídit podle přehledu v tabulce (Tabulka 1). K dispozici je velmi široká řada komerčních nástrojů aplikujících metody ve frekvenční i časové oblasti. Mezi nejrozšířenější patří CST MWS, FEKO, v automobilovém průmyslu pak EMC Studio.

¹¹ IBK – Industrie Bau Kasten – specifická skupina dílů průmyslové montáže.

- 3) Získání zdrojových dat a základní úprava modelu. Nejčastěji používanými zdrojovými daty pro EMC simulace jsou v automobilovém průmyslu crash modely. Byly identifikovány základní problémy, které musí být vyřešeny při získávání numerického modelu:
- 1) redukce extrémní nadbytečnosti dat původního modelu,
 - 2) odstranění nadbytečných povrchů redukovaného modelu,
 - 3) vhodné rozdělení modelu na funkční celky,
 - 4) definice velikosti sítě modelu,
 - 5) korekce chyb a kontrola výsledného modelu.
- 4) Příprava numerického modelu. Při přípravě numerického modelu se můžeme setkat s řadou problémů, které mohou zapříčinit zcela nereálný výsledek numerické simulace. Pro zajištění odpovídající kvality jsme stanovili základní pravidla pro diskretizaci modelu:
- 1) Respektování fázově závislých distribucí proudů a nábojů podél struktury modelu. Maximální velikost segmentu je $1/10$ nejkratší vlnové délky.
 - 2) Použití lokálně vyšší hustoty diskretizace v blízkosti hran modelu a dutin.
 - 3) Respektování hraničního poměru 1:5 jednotlivých stran trojúhelníkového segmentu.
 - 4) Zvýšení lokální hustoty sítě (sub-mesh) v blízkosti simulovaných vodičů z důvodu vysokého gradientu proudu a náboje.
 - 5) Stanovení maximálního poměru mezi délkou a průměrem drátěného segmentu (včetně tloušťky opláštění) na 3.
 - 6) Zajištění správné návaznosti trojúhelníkových segmentů: segmenty se navzájem nesmí překrývat, protínat a musí být připojeny skrze společné koncové body.
- 5) Analýza vhodné velikosti segmentu modelu vzhledem k maximální zkoumané frekvenci při dodržení podmínky ($< \lambda_{MAX} / 10$). Byly stanoveny základní velikosti segmentů a to 150 mm jako hrubý model na jednoduché experimenty a 80 mm jako standardní model s použitím sub-meshingu na náročné experimenty s horním frekvenčním omezením 375 MHz.
- 6) Volba funkčních celků modelu. Kompletní model vozidla doporučujeme rozdělit na dvě základní části s dalším rozpadem:
- 1) Model okované a montované karoserie (svařený skelet vozidla a montované dveře a víka).
 - 2) Další vkládané prvky mající zásadní vliv na změnu elektromagnetického prostředí vnitřní dutiny vozidla – agregát, přední náprava, výztuha palubní desky a konstrukce sedadel.

Pokud je analýza námi hledaného problému zaměřena na vnitřní prostor vozidla, doporučujeme použití modelu karoserie, výztuhy palubní desky a předních sedadel. Je-li analýza zaměřena na vnější prostor vozidla, použijeme karoserii vozu, model agregátu, výfuku a kol.

- 7) Definice materiálových konstant. V simulačním prostředí definujeme materiálové parametry karoserie (PEC, nebo reálný ztrátový materiál), zvolíme parametry zemní roviny (ideální zemní rovina, reálná zemní rovina suchá, reálná zemní rovina vlhká).
- 8) Volba zdroje zkušebního pole včetně jeho pozice. Doporučujeme použít vertikálně a horizontálně polarizovanou rovinnou vlnu v pozici z čela modelu. Rovněž doporučujeme simulace i z boku modelu (se stejnými parametry) pomocí horizontální polarizace z důvodu vybuzení jiných vlastních rezonančních módů dutiny karoserie.
- 9) Volba intenzity zkušebního pole E. Může být realizována dvěma způsoby. Prvním způsobem je konstantní intenzita v celém zkušebním rozsahu. Druhou možností je pak proměnná intenzita zkušebního pole v závislosti na maximální dosažené testovací intenzitě při předcertifikační zkoušce.
- 10) Způsoby sledování a měření výsledků simulace. Doporučujeme sledovat model pomocí řezů rozložení intenzity elektrického pole (přehled nad distribucí intenzity elektrického pole v prostoru), matice virtuálních sond elektrického pole (numerická kvantifikace frekvenční závislosti intenzity pole), mapy proudového rozložení na karoserii (identifikace povrchových proudů v rizikových oblastech modelu) a virtuálních sond napětí a proudu na kabelovém svazku (popis průběhu rušivého signálu na svazku).
- 11) Volba frekvenčního rozsahu simulace. Vždy dbáme na maximální horní frekvenci, pro kterou je používáný numerický model ještě použitelný - podmínka ($< \lambda_{MAX} / 10$). Při této úvaze se zaměřujeme také na komponenty, které v daném frekvenčním rozsahu mají z elektrodynamického hlediska význam. Frekvenční rozsah simulace nastavujeme vždy s přihlédnutím ke zkoumané problematice s takovým krokem, aby mohl postihnout typické jevy vyskytující se v dané frekvenční doméně.
- 12) Realizace zkušební simulace. Provedeme zkušební simulaci dle výše uvedených zásad pro jednu vybranou testovací frekvenci. Obvykle volíme kmitočet blízký teoreticky očekávané vlastní rezonanci vnitřní dutiny karoserie – prostoru pro posádku. Na tomto kmitočtu zkontrolujeme správnost interpretace veškerých způsobů měření výsledků. Zvláštní pozornost dále věnujeme kontrole rozložení povrchových proudů na karoserii. Zaměřujeme se místa styku jednotlivých částí a zejména dodatečně vytvořených spojení pro integraci dveří, vík a vkládaných dílů ke karoserii. Z pozorování musí být patrné, že proudy těmito oblastmi volně tečou a tato spojení netvoří v jejich průchodu překážku. V případě, že zjistíme v proudové distribuci problém, je nezbytné podrobit numerický model kontrole.
- 13) Realizace finální simulace. Pokud byla kontrola výpočtů na testovací frekvenci v pořádku, provedeme komplexní simulaci v celém uvažovaném rozsahu. Je-li to možné, uvažujeme pro zrychlení simulace nad distribucí či paralelizací výpočtu. Většina výpočetních nástrojů touto možností disponuje.

Detailní doporučení k provádění numerických simulací lze nalézt také v kapitole 2.6.1, která je základem pro tento souhrn informací.

5.4.3. DOPORUČENÍ PRO PROVÁDĚNÍ PŘEDCERTIFIKAČNÍCH MĚŘENÍ

Předcertifikační měření je ekvivalentem, či ideálně způsobem verifikace výsledků numerických simulací. Proto na základě poznatků zjištěných při realizaci vlastních měření stanovujeme následující doporučení pro jejich realizaci.

- 1) Volba vozidla vzhledem ke zkoumané problematice. Předcertifikační měření můžeme provádět buď za účelem verifikace numerických simulací, nebo samostatného řešení zkoušky odolnosti nestandardizovanou metodou. Podle toho volíme vhodnou výbavu zkušebního vozu. Pro verifikace numerických simulací volíme ideálně holou karoserii vozu vystrojenou částmi vozu majícími zásadní vliv na rozložení intenzity elektrického pole v karoserii. Obvykle se jedná o výztuhu palubní desky včetně volantu a sedadel (při řešení problému uvnitř vozidla). Pro zkoušku odolnosti nestandardizovanou metodou volíme vůz dle požadavků této zkoušky v sériovém stavu.
- 2) Demontáž vozu ke zkoušce (relevantní pouze při verifikaci numerické simulace). Klíčovým aspektem je zachování kvalitního vodivého spojení všech použitých částí vozu. Důležitost tohoto aspektu spočívá zejména ve snaze nezměnit tok povrchových proudů tekoucích při zkoušce elektromagnetickým polem po karoserii a neposunout, či zcela nezměnit rezonanční chování modelu vycházejícího právě z průtoku těchto proudů.
- 3) Realizace předcertifikačního pracoviště. Vzhledem ke způsobu provádění zkoušky vyzářeným elektromagnetickým polem musíme disponovat stíněným pracovištěm. Vzhledem k vysoké finanční náročnosti na pořízení či pronájem stíněné komory doporučujeme použití stíněných stanů.
- 4) Volba zkušební metody. Doporučujeme použití substituční metody umožňující nejvhodnější přístup k provádění zkoušky a kalibraci nezbytného výkonu. Metoda je založena na prvotní kalibraci měřicího místa na požadovanou úroveň intenzity zkušebního pole, která je následně použita při realizaci zkoušky s DUT.
- 5) Volba vybavení pro předcertifikační zkoušku. Předcertifikační zkoušku musíme realizovat přístroji pracujícími na stejném principu jako při zkoušce certifikační. Její nestandardnost ovšem spatřujeme ve volbě levného a dostupného vybavení s mnohem nižšími výkony a frekvenčními rozsahy. Doporučujeme použití USB low-cost RF generátorů a antén typu BiLog. Vzhledem k tomu, že výkonový RF zesilovač je nejdražší součástí přístrojového vybavení pro předcertifikační zkoušky, je velmi důležité určit, jaká intenzita zkušebního pole je nezbytná pro identifikaci rizikových míst v karoserii vozidla. Vzhledem k aspektům certifikačního měření doporučujeme zkušební intenzitu elektrického pole 30 V/m alespoň v 90 % zkoušeného pásma 30 – 220 MHz.
- 6) Ověření uniformity pole. Jako referenční bod doporučujeme používat osu předních kol vozidla, neboť představuje z hlediska rozložení uniformního pole ideální pozici. Uniformitu pole navrhujeme měřit v 6 bodech umístěných v klíčových pozicích karoserie vozidla. Body jsou navrženy ve dvou rovinách: vertikální a horizontální. V případě vertikální roviny se body nacházejí ve výšce 0,5 m, 0,8 m, 1 m a 1,2 m nad zemní rovinou. V případě horizontální roviny se body nacházejí v konstantní výšce 1,2 m nad zemní rovinou a jsou umístěny - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m od podélné osy vozidla (detail na Obr. 86).
- 7) Volba měřicích bodů ve vozidle. Chceme-li se zaměřit na porovnání výsledků numerických simulací pomocí předcertifikačního měření, je nezbytné vhodně volit

měřicí body pro umístění sondy intenzity elektrického pole v karoserii vozidla. Doporučujeme jejich umístění do měřicích os vyznačených provázky pevně uchycenými ke karoserii vozu. Měřicí osy by měly respektovat rozmístění klíčových řídicích jednotek ve voze, případně potřeby dané úlohy. V případě, že provádíme pouze předcertifikační zkoušku, není vyznačení os nutné.

- 8) Realizace předcertifikačního měření. Je-li cílem zkoušky maximální intenzita pole uvnitř karoserie, doporučujeme provádět zkoušku pomocí vertikálně polarizovaného zkušebního pole.
- 9) Rozbor intenzity elektrického pole v rozdílných modelech. Byly pozorovány zřejmé rozdíly při provádění zkoušky na vystrojené karoserii a v běžném vozidle. Při pozorování frekvenčních maxim zjištěných již na vystrojené karoserii se ukázalo, že šířka pásma těchto frekvenčních špiček je u sériového vozu podstatně větší. Toto chování vyplývá z odlišné jakosti rezonanční dutiny, která je v případě vystrojené karoserie podstatně vyšší, neboť se ve vnitřním prostoru vozidla nacházejí výhradně vodivé součásti vozu. Naopak prostor vozu v sériovém stavu je vystrojen množstvím plastových, látkových a skleněných součástí výrazně snižujících jakost této dutiny. Pozorovali jsme rovněž významný pokles měřené intenzity elektrického pole u sériového vozu, a to jak v oblasti frekvenčních maxim, tak i v ostatních částech zkoušeného pásma. Tento jev vyplývá ze zvýšené stínící účinnosti karoserie sériového vozu, neboť tato je vybavena pokovenými skleněnými výplněmi způsobujícími útlum procházejících vln, čímž dochází ke snížení míry vazby vnějšího a vnitřního prostředí. Vliv na tento jev má i snížená jakost rezonanční dutiny, ve které tak dochází ke vzniku podstatně nižších rezonančních maxim.

Detailní doporučení k provádění předcertifikačních měření lze nalézt také v kapitole 3.6, která je základem pro tento souhrn informací.

6. ZÁVĚR

Tato disertační práce pojednává o velmi aktuálním tématu předcertifikačních testů elektromagnetické odolnosti se zaměřením na specifické problémy automobilového průmyslu. Po důkladné analýze dostupných zdrojů týkajících se dané problematiky a rozboru získaných informací byly stanoveny čtyři dílčí cíle této práce vedoucí k nejvhodnějšímu způsobu realizace předcertifikační zkoušky elektromagnetické odolnosti osobního vozidla:

1. Vyvinout korektní numerický elektromagnetický model automobilu.
2. Definovat způsoby lokalizace rezonančních maxim v karoserii vozu pomocí numerické simulace.
3. Navrhnout metodiky měření intenzit elektromagnetických polí a předložit návrh předcertifikačního pracoviště pro zkoušky elektromagnetické odolnosti.
4. Provést certifikační měření a numerický model na základě jeho výsledků kalibrovat. Na základě výsledků stanovit komplexní doporučení pro provedení předcertifikační zkoušky.

První dva úzce související cíle disertační práce jsou diskutovány v kapitole 2. Ta se ve své první části zabývá zejména definicí základních problémů, na které můžeme při provádění numerické simulace automobilu z pohledu EMC narazit. V kapitole 2.2 je provedeno srovnání navrhovaných metod řešení včetně aplikace metody FSV. Dále jsou v kapitole 2.3 rozebrány aspekty získání numerického modelu, pravidel jeho úpravy a diskretizace. Kapitola 2.4 diskutuje otázky zjednodušení modelu a jeho modularizaci. Byla rovněž identifikována kritická místa významným způsobem ovlivňující nejistotu výsledků simulace rozložení elektromagnetického pole ve vozidle: přechodové rezistence závěsů dveří a dveřních zámků, plastické díly, mezery mezi jednotlivými kovovými součástmi, pokovení vnitřních skel a kovové rámečky řídicích jednotek a rádia. Kapitola 2.5 pak rozebírá vliv umístění zdroje testovacího pole, jeho polarizaci, umístění modelu vůči tomuto zdroji pole a výhody plynoucí ze zvolených postupů. Klíčovým výstupem kapitoly 2 je řada doporučení pro tvorbu korektního elektromagnetického modelu vozidla a provádění předcertifikačních simulací odolnosti vůči elektromagnetickému poli v prostředí automobilového průmyslu podložených analýzou dokumentovanou v jednotlivých podkapitolách této části práce. Tato doporučení následně slouží k realizaci ukázkové numerické simulace odhalující silné i slabé stránky navrhované metodiky. Provedením simulace získáváme také řadu dat určených pro nezbytné kvantitativní porovnání shody výsledků s výstupy předcertifikačních a certifikačních měření prezentovaných v kapitole 5.

Třetí z cílů této práce je popsán v kapitole 3. Kapitola 3.1 diskutuje otázky použití vhodného testovacího vozidla a zejména stavu jeho výbavy klíčové pro správnou interpretaci zkoumaných veličin nutných pro verifikaci numerických simulací i prosté předcertifikační zkoušky. Jsou zde také rozebrány nejdůležitější podmínky pro zachování správného toku povrchových proudů zásadně ovlivňujících rozložení intenzity elektrického pole v karoserii. Dále jsou v kapitole 3.2 diskutovány nejdůležitější aspekty realizace předcertifikačního měření spočívající zejména ve správné volbě měřicího pracoviště, techniky a zkušební metody. Zde doporučované předcertifikační metody navrhuji co nejméně nákladnou realizaci zkoušek nejen z pohledu pořízení a provozu zkušební techniky, ale i času použitého pro jejich přípravu a realizaci. Navrhovaná substituční metoda umožňuje provedení kalibrace pracoviště v jediném kroku a následně

použití získaných dat pro rozsáhlou řadu předcertifikačních měření. Další část kapitoly se pak věnuje návrhu vlastního způsobu měření uniformity pole včetně výsledků dosažených na použitém předcertifikačním pracovišti. Podle doporučení popsanych v kapitole 3 je na jejím závěru provedena řada předcertifikačních měření na dvou základních modelech vozů – vystrojené karoserii (kapitola 3.3) a sériovém voze (kapitola 3.4). Z následného porovnání (kapitola 3.5) vyplývá, že diferenciace modelů byla zvolena vhodně. Vystrojená karoserie je velmi vhodná pro verifikaci výsledků numerických simulací a sériový vůz pro vlastní předcertifikační zkoušky. Rozdíly spatřujeme zejména v útlumu rezonančních maxim a jejich rozšířené šířce pásma. Výsledky získané v této kapitole jsou rovněž podkladem pro srovnání s výstupy numerických simulací a certifikačních měření v kapitole 5.

Kapitola 4 diskutuje aspekty certifikačních měření. Ačkoliv nejsou tato měření cílem disertační práce, mají vysoký význam pro ověření správnosti navrhovaných simulačních a předcertifikačních metod. Vlastní certifikační měření jsou realizována na sériových vozech Škoda Octavia s plnou i prosklenou střechou. V kapitole je diskutován i vliv této varianty karoserie na rozložení intenzity elektrického pole.

V kapitole 5 jsou pomocí metody FSV objektivně srovnány shody výsledků všech dostupných sad dat, tedy předcertifikačních a certifikačních měření, simulací a předcertifikačních měření a simulací a certifikačních měření. Porovnání výsledků jasně ukazuje jak na správnost návrhu metody provádění numerických simulací, tak i předcertifikačních testů. Na základě těchto srovnání a poznatků uvedených v ostatních kapitolách jsou na závěr stanovena doporučení pro provádění předcertifikačních zkoušek a numerických simulací, která jsme si určili jako poslední a hlavní cíl této disertační práce.

Na základě zde prezentovaných doporučení je možno provést předcertifikační posouzení nového projektu a přijmout včas opatření nutná pro správnou funkci řídicích jednotek exponovaných vnějším elektromagnetickým polem. Díky tomu je možno významně snížit celkový počet zkoušek při vývoji nového vozového projektu zejména ve fázi prototypu. Není tak již nutné provádět základní ověření konceptu elektrické instalace vozidla a umístění řídicích jednotek na reálném voze, ale již podstatně dříve na virtuálním prototypu. Tento přístup umožňuje významně snížit požadavky na počty reálných zkouškových vozů, čímž se vývoj vozového projektu významným způsobem zlevňuje a rovněž zkracuje. Navíc se tím minimalizuje nutnost nasazení drahých nápravných opatření při odhalení chyb prvotního návrhu v pozdější vývojové fázi výroby.

Z těchto důvodů považujeme cíle disertační práce za splněné, neboť hlavním vytyčeným cílem práce je zlevnění a zrychlení zkoušek elektromagnetické odolnosti ve vozidlech, což se bezpochyby podařilo. Námětem na další pokračování práce je důkladná analýza kabelových svazků vozidla jakožto zdrojů i příjemců rušivých elektromagnetických polí a také vliv anténních prvků na danou problematiku. Budoucím cílem autora je zavedení komplexního numerického posouzení nových vozových projektů nejen z pohledu odolnosti vůči vnějším polím, ale i z hlediska rušivého vyzařování a pulzů v palubní síti.

Závěrem bych rád konstatoval, že ačkoliv nebyla realizace tohoto komplexního tématu nijak snadná, vždy mi přinášela potěšení a to zejména z důvodu velmi úzkého propojení akademické práce s reálným přínosem pro automobilový průmysl.

LITERATURA

- [1] VÍDENKA, Rostislav. Některé otázky předcertifikačních testů EMC. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Jiří Svačina.
- [2] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Jiří SVAČINA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. Elektromagnetická kompatibilita v automobilové technice. Elektrevue - Internetový časopis [online]. 2012, 2012(40), 1-7 [cit. 2017-01-10]. ISSN 1213- 1539. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz>
- [3] RŮŽEK, Václav a Jiří DŘÍNOVSKÝ. Předcertifikační testy s využitím numerických simulací pro testování elektromagnetické odolnosti: sborník semináře o řešení doktorského projektu Grantové agentury České republiky č. 102/08/HO27 v roce 2011. Brno: Vysoké učení technické, Ústav radioelektroniky, 2011. ISBN 978-80-214-4368-6.
- [4] COMMISSION DIRECTIVE 2004/104/EC.: of 14 October 2004 adapting to technical progress Council Directive 72/245/EEC relating to the radio interference (electromagnetic compatibility) of vehicles and amending Directive 70/156/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to the type-approval of motor vehicles and their trailers. 4. Brussel, Belgium: EU COMMISSION, 2004.
- [5] COMMISSION DIRECTIVE 2006/28/EC: of 6 March 2006 amending, for the purposes of their adaptation to technical progress, Council Directive 72/245/EEC of 20 June 1972 relating to the radio interference (electromagnetic compatibility) of vehicles and Council Directive 70/156/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to the type-approval of motor vehicles and their trailers. 4. Brussel, Belgium: EU COMMISSION, 2006.
- [6] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/30/EU: o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se elektromagnetické kompatibility. Brussel, Belgie: EU COMMISSION, 2014.
- [7] CISPR 25: Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. Ed. 4.0. Geneva, Switzerland: IEC, 2015.
- [8] CISPR 12: Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of receivers except those installed in the vehicle/boat/device itself or in adjacent vehicles/boats/device. Ed. 6. Geneva, Switzerland: IEC, 2012.
- [9] ISO 7637-1: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 1: Definitions and general considerations. Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2015.
- [10] ISO 7637-2: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only. Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2011.
- [11] ISO 7637-3: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 3: Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines. Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2016.
- [12] ISO 11451-1: Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology. Ed. 4. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2015.
- [13] ISO 11451-2: Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 2: Off-vehicle radiation sources. Ed. 4. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2015.
- [14] ISO 11451-3: Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: On-board transmitter simulation. Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2015.
- [15] ISO 11451-4: Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Bulk current injection (BCI). Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2013.

- [16] *ISO 11452-1: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology*. Ed. 4. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2015.
- [17] *ISO 11452-2: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 2: Absorber-lined shielded enclosure*. Ed. 2. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2004.
- [18] *ISO 11452-3: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: Transverse electromagnetic (TEM) cell*. Ed. 3. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2016.
- [19] *ISO 11452-4: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods*. Ed. 4. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2011.
- [20] *ECE 10: Dohoda o přijetí jednotných technických pravidel pro kolová vozidla, zařízení a části, které se mohou montovat a/nebo užívat na kolových vozidlech a o podmínkách pro vzájemné uznávání homologací udělených na základě těchto pravidel: Jednotná ustanovení pro homologaci vozidel z hlediska elektromagnetické kompatibility*. R5. Geneva, Switzerland: Organizace spojených národů, 2014.
- [21] *SAE 551/11: Vehicle Electromagnetic Immunity-Off-Vehicle Source*. 2010. Troy, MI, United States: SAE International, 2010.
- [22] *SAE 551/12: Vehicle Electromagnetic Immunity-On-Board Transmitter Simulation*. 2009. Troy, MI, United States: SAE International, 2009.
- [23] SCHNEIDER, D., M. BOETTECHER, S. TENBOHLEN a W. KOEHLER. Estimation of Radiated Emissions of an Automotive HV - Inverter in a Distributed System. In: *Proceedings of EMC'14/Tokyo: 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Tokyo, 2014, s. 457–460.
- [24] BINGYAO SUN, S. a Rolando BURGOS. Assessment of switching frequency impact on the prediction capability of common-mode EMI emissions of sic power converters using unterminated behavioral models. In: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Charlotte, NC: IEEE, 2015, s. 1153-1160. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104493. ISBN 978-1-4799-6735-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7104493/>
- [25] MEE, Scott W., Sreeniwas RANGANATHAN, Craig HARDER a Steve MAINVILLE. Vehicle EMI Integration Issues Identified by Precompliance Test Methods. In: *2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2007, s. 1-6. DOI: 10.1109/ISEMC.2007.37. ISBN 1-4244-1349-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4305617/>
- [26] *ISO 11452-5: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 5: Stripline*. Ed. 2. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2002.
- [27] GRAHAM, W. *The Notes of Dr. Karl E. Baum. The Electromagnetic Fields Produced by a General Current Distribution in a Conductive Environment Under Certain Symmetry Conditions* [online]. Air Force Weapon Laboratory, 1964 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/TheoreticalPDFs/TN021.pdf>
- [28] ASCHENBERG, M., D. GOTTWALD a C. GRASSO. EMC precompliance testing - prediction not correlation. In: *2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No.04CH37559)*. IEEE, 2004, s. 1-4. DOI: 10.1109/ISEMC.2004.1349985. ISBN 0-7803-8443-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1349985/>
- [29] FARBER, Leonard. Statistical Correlation Between Field Strengths at an Open Area Site and in an Absorber-Lined Chamber. In: *1985 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 1985, s. 1-8. DOI: 10.1109/ISEMC.1985.7567009. ISBN 978-1-5090-3172-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7567009/>
- [30] HEMMING, L.H. The Chamber Method. A Method for Correlating to the Open Field Side. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Arlington: IEEE, 1983.

- [31] LEFERINK, F., G. HILVERDA, D.G. BOERLE a W. VAN ET TEN. Radiated electromagnetic fields of actual devices measured in different test environments. In: *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446)*. IEEE, 2003, s. 558-563. DOI: 10.1109/ISEMC.2003.1236663. ISBN 0-7803-7835-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1236663/>
- [32] RAZAVI, Seyyed Ali Hassanpour a Stephan FREI. Characterization of current transformers for impedance measurements in automotive immunity test setups. In: *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. IEEE, 2016, s. 411-416. DOI: 10.1109/EMCEurope.2016.7739238. ISBN 978-1-5090-1416-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739238/>
- [33] ADAMS, J.W., J. CRUZ a D. MELQUIST. Comparison measurements of currents induced by radiation and injection. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. **34**(3), 360-362. DOI: 10.1109/15.155856. ISSN 00189375. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/155856/>
- [34] HILL, D.A. Currents induced on multiconductor transmission lines by radiation and injection. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1992, **34**(4), 445-450. DOI: 10.1109/15.179277. ISSN 00189375. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/179277/>
- [35] PIGNARI, S. a F.G. CANAVERO. Theoretical assessment of bulk current injection versus radiation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1996, **38**(3), 469-477. DOI: 10.1109/15.536077. ISSN 00189375. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/536077/>
- [36] GRASSI, Flavia, Giordano SPADACINI, Filippo MARLIANI a Sergio A. PIGNARI. Use of Double Bulk Current Injection for Susceptibility Testing of Avionics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008, **50**(3), 524-535. DOI: 10.1109/TEMPC.2008.926810. ISSN 0018-9375. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4586417/>
- [37] HASSANPOUR, S.A., S. RAZAVI, S. MIROPOLSKY a S. FREI. Verbesserung der Korrelation zwischen dem BCI-und dem Antennenprüfverfahren für Kfz-Komponenten durch Anpassung von Verstärkerleistung und Position der BCI-Zange. In: *Proceedings of EMV-Dusseldorf*. Dusseldorf: EMV, 2013, s. 291-297.
- [38] RŮŽEK, Václav a Jiří DŘÍNOVSKÝ. Aspects of EMS precompliance testing. In: *Proceedings of 9th international conference Vsacký Cáb 2011*. Semily: Tiskárna Atom, 2011, s. 117-121. ISBN 978-80-214-4319-8.
- [39] MACHÁČ, J., K. NOVOTNÝ a Z. ŠKVOR. *Numerické metody v elektromagnetickém poli*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2476-8.
- [40] ŘEZNÍČEK, Zdeněk. *Numerická analýza vlivu elektromagnetických polí na malá letadla*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [41] ALVAREZ, J., L. ANGULO, M. BANDINELLI, et al. HIRF interaction with metallic aircrafts. A comparison between TD and FD methods. In: *Proceeding of Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on*. Rome: IEEE, 2012, s. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396703. ISBN 10.1109/EMCEurope.2012.6396703. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6396703/>
- [42] SADIKU, Matthew N. O. *Numerical techniques in electromagnetics*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. ISBN 08-493-1395-3.
- [43] HARRINGTON, Roger F. *Field computation by moment methods*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1993. ISBN 978-0-7803-1014-8.
- [44] CONCEPT-II. *CONCEPT-II* [online]. Hamburg, Germany: Institut of Electromagnetic Theory, 2013 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.tet.tu-harburg.de>
- [45] JOÃO PEDRO A. BASTOS a Nelson SADOWSKI. *Electromagnetic modeling by finite element methods*. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 02-039-1117-2.
- [46] ILIC, A. Z., S. V. SAVIC, M. M. ILIC a B. M. NOTAROS. Analysis of Electromagnetic Scatterers using Hybrid Higher Order FEM-MoM Technique. In: *Proceedings of the 16th Telecommunications Forum - TELFOR 2008*. Belgrade, Serbia, 2008, s. 480-483.

- [47] JOHNSON, D., I. MUNTEANU a T. WEILAND. Efficient computer simulation of EMC problems with time domain algorithms. In: *Aerospace EMC, 2012 Proceedings ESA Workshop on*. Venice, Italy: IEEE, 2012, s. 1-6. ISBN 978-1-4673-0302-6. ISSN 978-92-9092-266-7.
- [48] WEILAND, T. Eine Methode zur Lösung der Maxwellschen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis. *Electronics and Communication*. 1977, **31**(3), 116-120.
- [49] WEILAND, T. Time Domain Electromagnetic Field Computation with Finite Difference Methods. *International Journal of Numerical Modelling*. 1996, **9**(4), 295-319.
- [50] KANE YEE. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1966, **14**(3), 302-307. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693. ISSN 0018-926x. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1138693/>
- [51] TAFLOVE, Allen. a Susan C. HAGNESS. *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. 3rd ed. /. Boston: Artech House, 2005. ISBN 978-1580538329.
- [52] AMMANN, M. W. *Non-Trivial Materials in EM-FDTD*. Zurich, 2007. Diplomová práce. Department of Physics Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich. Vedoucí práce Dr. N. Chavannes, S. Schild.
- [53] VARADARAJAN, V. a R. MITTRA. Finite-difference time-domain (FDTD) analysis using distributed computing. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1994, **4**(5), 144-145. DOI: 10.1109/75.289515. ISSN 1051-8207. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/289515/>
- [54] KUO, Chih-Wen a Chih-Ming KUO. Finite-Difference Time-Domain Analysis of the Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures With Apertures Using a Novel Subgridding Algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2016, **58**(5), 1595-1601. DOI: 10.1109/TEM.2016.2572210. ISBN 10.1109/TEM.2016.2572210. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7488244/>
- [55] JOHNS, P.B. a R.L. BEURLE. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. *Proceedings of the Institution*. 1971, **118**(9), 1203-1208. DOI: 10.1049/piee.1971.0217. ISBN 10.1049/piee.1971.0217. Dostupné také z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1971.0217>
- [56] JOHNS, P.B. A Symmetrical Condensed Node for the TLM Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1987, **35**(4), 370-377. DOI: 10.1109/TMTT.1987.1133658. ISBN 10.1109/TMTT.1987.1133658. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1133658/>
- [57] RAUTIO, James C. RFIC Design Methodologies Using Perfectly Calibrated Internal Ports. In: *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium on*. Monterey, CA, 2005, s. 1-5. DOI: 10.1109/CSICS.2008.13. ISBN 10.1109/CSICS.2008.13. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4674468/>
- [58] RUDDLE, A., D. WARD, A. WILLIAMS a A. DUFFY. Objective validation of automotive EMC models. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.98CH36253)*. Denver, USA, 1998, s. 475-479. DOI: 10.1109/IEMC.1998.750139. ISBN 10.1109/IEMC.1998.750139. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/750139/>
- [59] DUM, A. P., M. S. WOOLFSON a T. M. BENSON. Use of correlation functions to assist the experimental validation of numerical techniques. *Microwave and Optical Technology Letters*. 1994, **7**(8), 361-364.
- [60] PEUTEMAN, J., J. CATRYSSSE, R. BELMANS a J. KNOCKAERT. Modifying the feature-selective validation method to validate noisy data sets. *IET Science, Measurement & Technology*. 2008, **2**(4), 244-257. DOI: 10.1049/iet-smt:20070063. ISBN 10.1049/iet-smt:20070063. Dostupné také z: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt_20070063.
- [61] WILLIAMS, A.J.M., M. S. WOOLFSON, T. M. BENSON a A. P. DUFFY. Quantitative validation of numerical technique results against experimental data. In: *Proceedings of 10th International Conference on Antennas and Propagation*. IEEE, 1997, s. 532-535. DOI: 10.1049/cp:19970312. ISBN 10.1049/cp:19970312. Dostupné také z: http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_19970312

- [62] *IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations: IEEE Std 1597.1-2008*. IEEE, 2008.
- [63] *IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations: IEEE Std 1597.2-2010*. IEEE, 2011.
- [64] ARCHAMBEAULT, B., S. PRATAPNENI, L. ZHANG a D.C. WITTEWER. Comparison of various numerical modeling tools against a standard problem concerning heat sink emissions. In: *Symposium Record. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2001, s. 1341–1346. DOI: 10.1109/IEMC.2001.950651. ISBN 10.1109/IEMC.2001.950651. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/950651/>
- [65] ARCHAMBEAULT, B., S. PRATAPNENI, L. ZHANG, D.C. WITTEWER a J. CHEN. A proposed set of specific standard EMC problems to help engineers evaluate EMC modeling tools. In: *Symposium Record. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2001, s. 1335–1340. DOI: 10.1109/IEMC.2001.950650. ISBN 10.1109/IEMC.2001.950650. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/950650/>
- [66] ARCHAMBEAULT, B. a A. RUEHLI. Introduction to 2001 special challenging EMC modeling problems. In: *Symposium Record. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2001, s. 799–804. DOI: 10.1109/IEMC.2001.950478. ISBN 10.1109/IEMC.2001.950478. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/950478/>
- [67] ARCHAMBEAULT, B. a A. RUEHLI. Review of 1998 TC-9 challenging problems results and 1999 TC-9 challenging problems introduction [EMC]. In: *Symposium Record. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 1999, s. 667–672. DOI: 10.1109/IEMC.1999.810097. ISBN 10.1109/IEMC.1999.810097. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/810097/>
- [68] *Modeling Web site: IEEE Electromagnetic Compatibility Society* [online]. IEEE, 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.ewh.ieee.org/cmte/tc9/>
- [69] COLEBY, D. E. a A. P. DUFFY. A visual interpretation rating scale for validation of numerical models. *COMPEL: International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2005, **24**(4), 1078–1092.
- [70] DUFFY, A.P., A.J.M. MARTIN, A. ORLANDI, G. ANTONINI, T.M. BENSON a M.S. WOOLFSON. Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetics (CEM). Part I—The FSV Method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2006, **48**(3), 449–459. DOI: 10.1109/TEMC.2006.879358. ISBN 10.1109/TEMC.2006.879358. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1677778/>
- [71] ORLANDI, A., A.P. DUFFY, B. ARCHAMBEAULT, G. ANTONINI, D.E. COLEBY a S. CONNOR. Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetics (CEM). Part II— Assessment of FSV Performance. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2006, **48**(3), 460–467. DOI: 10.1109/TEMC.2006.879360. ISBN 10.1109/TEMC.2006.879360. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1677779/>
- [72] BRENCH, Colin E. a Bronwyn L. BRENCH. Application of the Feature Selective Validation method to test site evaluation. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Austin, USA: IEEE, 2009, s. 254–258. DOI: 10.1109/IEMC.2009.5284663. ISBN 10.1109/IEMC.2009.5284663. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5284663/>
- [73] SADIKU, M.N.O. a A.F. PETERSON. A comparison of numerical methods for computing electromagnetic fields. In: *Proceedings of the IEEE Southeast Conference*. New Orleans: IEEE, 1990, s. 42–47. DOI: 10.1109/SECON.1990.117766. ISBN 10.1109/SECON.1990.117766. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/117766/>
- [74] *EMC Studio: Computer Simulation Software* [online]. Tbilisi: EMCOS, 2017 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <https://www.emcos.com/?products=emc-studio>
- [75] ZARIDZE, R., V. TABATADZE, I. PETOEV, D. KAKULIA a T. TCHABUKIANI. Emission source localization using the method of auxiliary sources. In: *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. Wrocław: IEEE, 2016, s. 829–834. DOI: 10.1109/EMCEurope.2016.7739167. ISBN 10.1109/EMCEurope.2016.7739167. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739167/>

- [76] ZARIDZE, Revaz, Vasil TABATADZE, Ivan PETOEV a Tornike TCHABUKIANI. Optimal antenna synthesis problem solution using the method of auxiliary sources. In: *IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS)*. Tel-Aviv: IEEE, 2015, s. 1-4. DOI: 10.1109/COMCAS.2015.7360377. ISBN 10.1109/COMCAS.2015.7360377. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7360377/>
- [77] TAZI, H., C. ULLRICH a T. F. EIBERT. Virtual development of automotive antennas printed on glass using a hybrid of method of moments and method of auxiliary sources. In: *Asia-Pacific Microwave Conference 2011*. Melbourne: VIC, 2011, s. 614-617.
- [78] CHABANE, Sofiane, Philippe BESNIER a Marco KLINGLER. A Modified Enhanced Transmission Line Theory Applied to Multiconductor Transmission Lines. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2017, **59**(2), 518-528. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2611672. ISBN 10.1109/TEMC.2016.2611672. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7590082/>
- [79] VIDAL-GARCIA, P. a E. GAGO-RIBAS. Complex analysis of the Transmission Line Theory: Analytical characterization and examples of use. In: *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*. Shanghai: IEEE, 2016, s. 3262-3266. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735278. ISBN 10.1109/PIERS.2016.7735278. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7735278/>
- [80] SLATER, J. C. Microwave Electronics. *Rev. Mod. Phys.* American Physical Society, 1946, **18**(4), 441-512.
- [81] TESAŘ, Jan. *Měření permitivity plynů rezonátorovou metodou*. Brno, 2010. Diplomová práce. Masarykova univerzita Brno.
- [82] *Katalog Škoda Octavia* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/SiteCollectionDocuments/skoda-auto/ke-stazeni/octavia-katalog.pdf>
- [83] RŮŽEK, V., J. DŘÍNOVSKÝ a J. ZACHAR. Novel probe position for WBFC measurement method. *Przegląd Elektrotechniczny*. Wrocław, 2012, **88**(3a/2012), 220-224. ISSN 0033-2097.
- [84] GONSER, M., C. KELLER, J. HANSEN, V. KHILLKEVICH, A. RADCHENKO, D. POMMERENKE a R. WEIGEL. Simulation of automotive EMC emission test procedures based on cable bundle measurements. In: *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Montreal, QC, Canada: IEEE/MTT-S, 2012, s. 1-3. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259432. ISBN 978-1-4673-1088-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6259432/>
- [85] GONSER, Markus, Christoph KELLER, Jan HANSEN a Robert WEIGEL. Advanced simulations of automotive EMC measurement setups using stochastic cable bundle models. In: *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Beijing, China: IEEE, 2010, s. 590-593. DOI: 10.1109/APEMC.2010.5475696. ISBN 978-1-4244-5623-9. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5475696/>
- [86] JIA, Jin, Denis RINAS a Stephan FREI. Predicting the Radiated Emissions of Automotive Systems According to CISPR 25 Using Current Scan Methods. *Electromagnetic Compatibility IEEE Transactions on*. IEEE, 2016, **58**(2), 409-418. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2511185. ISBN 10.1109/TEMC.2015.2511185. ISSN 1558-187X. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7378944/>
- [87] *Harness studio user's manual* [online]. Tbilisi: EMCOS, 2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: www.emcos.com
- [88] *Overview of Feko* [online]. Stellenbosch: Altair Development S.A., 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: www.feko.info
- [89] YAVOLOVSKAYA, E., G. CHIQOVANI, G. GABRIADZE, S. IOSAVA, L. SVANIDZE, B. WILLMANN a R. JOBAVA. Simulation of human exposure to electromagnetic fields of inductive wireless power transfer systems in the frequency range from 1 Hz to 30 MHz. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. Wrocław: IEEE, 2016, s. 491-496. DOI: 10.1109/EMCEurope.2016.7739265. ISBN 978-1-5090-1416-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7739265/>
- [90] *RF-Shielded Tents EMC /RFI / TEMPEST* [online]. Como, Italy: Soliani EMC, 2017 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.solianiemc.com/products/shielded-tent/rf-shielded-tents-emc-rfi-tempest/>

- [91] *EMI / FRI shielded tent* [online]. Dordrecht, The Neederlands: Holland Shielding Systems BV, 2017 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: https://hollandshielding.com/content/Filemanager/EMI%20RFI%20shielded%20tents.pdf_June-2-2017-1205pm.pdf
- [92] *6GHz Compact Signal Generator* [online]. Gardnerville, USA: DS Instruments, 2017 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <https://www.dsinstruments.com/store/products/sg6000l-rf-signal-generator/>
- [93] *Calibrated Signal Generator*. [online]. Austin, USA: RF Consultant, 2016 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.rf-consultant.com/calibrated-signal-generator/>
- [94] *BILOG® ANTENNA 30 MHz to 2 GHz* [online]. Reinach, Switzerland: Teseq, 2017 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: www.teseq.com/products/downloads/datasheet/CBL_6112D.pdf
- [95] *CBL 6111D. BILOG® ANTENNA 30 MHz to 1 GHz*. [online]. Reinach, Switzerland: TESEQ, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: www.teseq.com/products/downloads/datasheet/CBL_6111D.pdf
- [96] *NBM-550 broadband field meter* [online]. Hauppauge, USA: Narda Safety Test Solution, 2017 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/NBM550_DataSheet.pdf
- [97] KOPECKÝ, P. *Automatizace měření EM pole měřičem Narda NBM-550*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Doc. Zdeněk Nováček
- [98] *ESM-100 3D Fieldmeter* [online]. Bad Wörishofen, Germany: Maschek Elektronik, 2016 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <https://www.maschek.de/pdf/ESM-100-FFT-EN.pdf>
- [99] *The RadiSense - Series of EMC Field Probes* [online]. Woerden, The Netherlands: DARE!! Development, 2016 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.dare.eu/instruments/emc-probes>
- [100] ČSN EN 61000-4-3: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti*. Ed. 3. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [101] DŘÍNOŠKÝ, J., T. FRÝZA, J. SVAČINA, Z. KEJÍK a V. RŮŽEK. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://www.radio.feec.vutbr.cz/emc>
- [102] *Field uniformity* [online]. Henfield, United Kingdom: Wave Scientific, 2016 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.wave-scientific.com/services/anechoic-chamber-validation/field-uniformity/>
- [103] DRINOVSKY, Jiri, Zdenek KEJIK, Vaclav RUZEK a Jiri ZACHAR. Modification of approximate worst-case measurement system for EMI filters. In: *Proceedings of 15th Conference Microwave Techniques COMITE 2010*. Brno: MJ Servis Brno, 2010, s. 91-94. DOI: 10.1109/COMITE.2010.5481866. ISBN 978-1-4244-6319-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5481866/>
- [104] KEJÍK, Z., J. DŘÍNOŠKÝ a V. RŮŽEK. Application Optimization to Search Values of Spurious Elements of EMI Filters. In: *Proceedings of the 17th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2010*. Lodz: IEEE, 2010, s. 505-509. ISBN 978-83-928756-3-5.
- [105] RUZEK, Vaclav, Jiri DRINOVSKY, Zdenek KEJIK a Jiri ZACHAR. Influence of the probe position to disturbance measurement in the Workbench Faraday Cage. In: *Proceedings of 21st International Conference Radioelektronika 2011*. Brno: BUT, 2011, s. 251-254. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2011.5936461. ISBN 978-1-61284-322-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5936461/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Přehledové schéma pracoviště zkoušek odolnosti vůči vnějším zdrojům rušení dle ISO 11451-2. Převzato z [12].	- 5 -
Obr. 2 – Schéma realizace zkoušky odolnosti vůči vnějším zdrojům rušení dle ISO 11451-2. Převzato z [12].	- 5 -
Obr. 3 – Reálné pracoviště zkoušek odolnosti vůči vnějšmu elektromagnetickému poli.	- 7 -
Obr. 4 – Metody validace modelu dle interní či externí reference, převzato z [62].	- 18 -
Obr. 5 – VRS pro vizuální hodnocení shody dat, převzato z [62].	- 23 -
Obr. 6 – Základní rozměry vozu Škoda Octavia 3. generace, použitého pro přípravu testovacího modelu. Převzato z [82].	- 33 -
Obr. 7 – Navržený testovací model, reprezentující vnitřní prostor karoserie vozidla Škoda Octavia.	- 34 -
Obr. 8 (vlevo) – Zobrazení řezné roviny Y pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.	- 36 -
Obr. 9 (vpravo) – Zobrazení řezné roviny X pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.	- 36 -
Obr. 10 (vlevo) - Zobrazení řezné roviny Z pro vyhodnocení rozložení intenzity elektrického pole uvnitř testovacího modelu. Řezné roviny zůstávají pro řešení pomocí obou numerických metod stejné.	- 37 -
Obr. 11 (vpravo) – Umístění virtuální sondy elektrického pole uvnitř testovacího modelu v jeho geometrickém středu na souřadnicích $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, $z = 450 \text{ mm}$.	- 37 -
Obr. 12 – Testovací model tvořený trojúhelníkovou sítí připravený k simulaci rozložení intenzity elektrického pole pomocí MoM. Na obrázku vlevo je zdroj zkušební pole.	- 37 -
Obr. 13 – Orientace zkušebního modelu vůči měřicím osám při expozici zkušebním polem tvořeným rovinnou vlnou z čela modelu. Červeně označena vlnoplocha přicházející rovinné vlny.	- 38 -
Obr. 14 – Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 38 -
Obr. 15 – Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 39 -
Obr. 16 – Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 39 -
Obr. 17 – Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 39 -
Obr. 18 – Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z čela karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 40 -
Obr. 19 – Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $ E_{\text{tot}} $ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.	- 40 -
Obr. 20 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $ E_{\text{tot}} $ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.	- 41 -
Obr. 21 - Orientace zkušebního modelu vůči měřicím osám při expozici zkušebním polem tvořeným rovinnou vlnou z boku modelu. Červeně označena vlnoplocha přicházející rovinné vlny.	- 42 -
Obr. 22 - Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 43 -
Obr. 23 - Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 43 -
Obr. 24 - Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při vertikální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 43 -
Obr. 25 - Frekvenční závislost složky Y intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 44 -
Obr. 26 - Frekvenční závislost složky X intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 44 -
Obr. 27 - Frekvenční závislost složky Z intenzity elektrického pole v měřicím bodě při horizontální polarizaci zkušební rovinné vlny s $E = 1 \text{ V/m}$ z boku karoserie. Vlevo výsledky získané pomocí SW EMC Studio, vpravo pak CST MWS.	- 44 -
Obr. 28 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $ E_{\text{tot}} $ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z boku vertikálně polarizovanou vlnou.	- 45 -
Obr. 29 - Srovnání absolutních hodnot intenzity elektrického pole $ E_{\text{tot}} $ obou simulačních nástrojů při expozici testovacího modelu z boku horizontálně polarizovanou vlnou.	- 45 -

Obr. 30 – ADM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.....	47 -
Obr. 31 – FDM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.....	47 -
Obr. 32 – GDM při expozici testovacího modelu z čela vertikálně polarizovanou vlnou.....	47 -
Obr. 33 – ADM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.....	48 -
Obr. 34 – FDM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.....	48 -
Obr. 35 – GDM při expozici testovacího modelu z čela horizontálně polarizovanou vlnou.....	49 -
Obr. 36 – ADM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou.....	49 -
Obr. 37 – FDM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou.....	50 -
Obr. 38 – GDM při expozici testovacího modelu zleva vertikálně polarizovanou vlnou.....	50 -
Obr. 39 – ADM při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou.....	51 -
Obr. 40 – FDM při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou.....	51 -
Obr. 41 – GDM při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou.....	52 -
Obr. 42 – Frekvenční průběh FDMi při expozici testovacího modelu zleva horizontálně polarizovanou vlnou. Červeně označeny výsledky získané pomocí CST, modře pomocí EMC Studia.....	52 -
Obr. 43 – Posloupnost toku simulačních dat procesem jejich přípravy pro účely numerické simulace. Předpokládáme získání konstrukčních dat (např. pro CRASH simulace), jejich zpracování externím pre-procesorem a využití v simulačním nástroji (např. EMC Studio).....	58 -
Obr. 44 – Příklad chybného (vlevo) a správného (vpravo) připojení vodičů k povrchu modelu.....	59 -
Obr. 45 – Příklad chybné (vlevo) a správné (vpravo) provedení gradientního přechodu mezi malými a velkými prvky diskretizační sítě.....	59 -
Obr. 46 – Překrývající se segmenty na modelu vozu Škoda Roomster.....	60 -
Obr. 47 – Detaily karoserie vozu Škoda Roomster pro model s velikostí prvku sítě 7mm.....	61 -
Obr. 48 – Model vozu SK258 - prvky s velikostí 150 mm.....	62 -
Obr. 49 – Základní model karoserie vozidla rozdělený podle funkčních celků majících zásadní vliv na změnu vnitřního elektromagnetického prostředí vnitřní dutiny.....	63 -
Obr. 50 – Doplnkové části geometrie numerického modelu. Jedná se o agregát, přední nápravu, výztuhu palubní desky a konstrukce sedadel.....	63 -
Obr. 51 – Rozložení intenzity elektrického pole v holé karoserii vozu Škoda Rapid na frekvenci 68 MHz. Model je exponován z čela vertikálně polarizovaným polem o intenzitě $E = 30$ V/m, intenzita el. pole v místě sondy $E_s = 41$ V/m.....	68 -
Obr. 52 – Rozložení intenzity elektrického pole v plně vystrojeném modelu vozu Škoda Rapid na frekvenci 68 MHz. Model je exponován z čela vertikálně polarizovaným polem o intenzitě $E = 30$ V/m, intenzita el. pole v místě sondy $E_s = 151,5$ V/m.....	69 -
Obr. 53 – Schematické znázornění umístění zdrojů testovacího pole. Červeně označena zemní rovina.....	72 -
Obr. 54 – Umístění měřicích bodů uvnitř karoserie vozidla zdrojů testovacího pole. V blízkosti volantu na levé straně bod TP4 (6697), na střední konzole bodu TP3 (6954), v prostoru mezi sedadly bod TP2 (6960) a vpravo bod TP1 (7208).....	72 -
Obr. 55 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici z čela, ver. polarizace.....	73 -
Obr. 56 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici z čela, hor. polarizace.....	73 -
Obr. 57 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zleva, ver. polarizace.....	74 -
Obr. 58 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zleva, hor. polarizace.....	74 -
Obr. 59 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zezadu, ver. polarizace.....	74 -
Obr. 60 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zezadu, hor. polarizace.....	75 -
Obr. 61 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zprava, ver. polarizace.....	75 -
Obr. 62 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici zprava, hor. polarizace.....	75 -
Obr. 63 – Frekvenční závislost intenzity el. pole v bodech TP1-TP4 při expozici shora, ver. polarizace.....	76 -
Obr. 64 – Pozice měřicích bodů v osách 1 – 4.....	82 -
Obr. 65 – Umístění měřicích bodů v osách x.....	82 -
Obr. 66 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 1, vertikální polarizace, EMC Studio.....	83 -
Obr. 67 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 1, horizontální polarizace, EMC Studio.....	84 -
Obr. 68 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 2, vertikální polarizace, EMC Studio.....	85 -
Obr. 69 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 2, horizontální polarizace, EMC Studio.....	86 -
Obr. 70 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 3, vertikální polarizace, EMC Studio.....	87 -
Obr. 71 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose 3, horizontální polarizace, EMC Studio.....	88 -
Obr. 72 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose x, vertikální polarizace, EMC Studio.....	89 -
Obr. 73 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v ose x, horizontální polarizace, EMC Studio.....	89 -
Obr. 74 – Odstrojená karoserie vozu Škoda Octavia.....	98 -
Obr. 75 – Umístění karoserie vozidla na vozíku s nevodivými koly.....	99 -
Obr. 76 – Detail výztuhy palubní desky.....	100 -
Obr. 77 – Umístění kompletních sedadel do karoserie vozidla.....	101 -
Obr. 78 – Typický průběh stínící účinnosti stíněného stanu. Převzato z [91].....	103 -
Obr. 79 – Stíněný stan pro účely předcertifikační zkoušky EMC. Převzato z [89].....	103 -
Obr. 80 – Budicí výkon antény nutný pro dosažení konstantní intenzity zkušební pole v uvažovaném frekvenčním rozsahu.....	105 -
Obr. 81 – Zjednodušený diagram postupu kalibračního měření u substituční metody.....	107 -
Obr. 82 – Diagram postupu zkoušky při použití metody nastavení výkonu v uzavřené smyčce.....	108 -

Obr. 83 – Typická frekvenční závislost VSWR v EMC hojně používané BILOG antény CBL-6112D. Převzato z [94].	- 109 -
Obr. 84 – Měření uniformity pole dle EN 61000-4-3. Převzato z [100].	- 110 -
Obr. 85 – Schematické znázornění umístění referenčního bodu dle normy ISO 11452 pro osobní vozidla s maximální výškou střechy 2 m.	- 111 -
Obr. 86 – Návrh umístění kalibračních sond – pohled z čela. Modře označeny sondy vertikální měřicí roviny, oranžově pak sondy horizontální měřicí roviny. Sonda společná pro obě roviny je pak označena modro-oranžově.	- 112 -
Obr. 87 – Detail umístění jednotlivých sond elektrického v referenčním bodě vozidla a vertikální rovině – pohled z boku. Jednotlivé sondy jsou umístěny ve výšce 0,5m, 0,8m, 1m a 1,2m nad zemní rovinou.	- 112 -
Obr. 88 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech 1,2 m, 1 m, 0,8 m a 0,5 m vertikální měřicí roviny pro vertikální polarizaci zkušebního signálu.	- 114 -
Obr. 89 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech 1,2 m, 1 m, 0,8 m a 0,5 m vertikální měřicí roviny pro horizontální polarizaci zkušebního signálu.	- 114 -
Obr. 90 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m horizontální měřicí roviny pro vertikální polarizaci zkušebního signálu.	- 115 -
Obr. 91 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v kalibračních bodech - 0,5 m, 0 m, + 0,5 m horizontální měřicí roviny pro horizontální polarizaci zkušebního signálu.	- 115 -
Obr. 92 – Interiér vozidla osazený komponenty zvolenými k předcertifikační zkoušce s vyznačenými osami měření.	- 117 -
Obr. 93 – Ilustrační obrázek měření intenzity elektrického pole uvnitř karoserie vozidla na holé karoserii.	- 118 -
Obr. 94 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.	- 119 -
Obr. 95 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.	- 120 -
Obr. 96 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 2, vertikální polarizace.	- 121 -
Obr. 97 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 2, horizontální polarizace.	- 122 -
Obr. 98 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 3, vertikální polarizace.	- 123 -
Obr. 99 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, osa 3, horizontální polarizace.	- 124 -
Obr. 100 – Umístění měřících bodů a os v sériovém vozidle pro účely předcertifikačního měření.	- 127 -
Obr. 101 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, kompletní vůz, osa 1, vertikální polarizace.	- 128 -
Obr. 102 – Frekvenční závislost intenzity el. pole – předcertifikační měření, kompletní vůz, osa 1, horizontální polarizace.	- 129 -
Obr. 103 – Rozdíl intenzity elektrického pole měřeného v holé karoserii vůči plně vystrojenému sériovému vozidlu. Předcertifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.	- 134 -
Obr. 104 – Rozdíl intenzity elektrického pole měřeného v holé karoserii vůči plně vystrojenému sériovému vozidlu. Předcertifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.	- 135 -
Obr. 105 – Konfigurace zkoušky elektromagnetické odolnosti na certifikovaném pracovišti. Ilustrační fotografie.	- 138 -
Obr. 106 – Způsob umístění sond intenzity elektrického pole Dare! v měřicí ose č. 1.	- 139 -
Obr. 107 – Způsob umístění sond intenzity elektrického pole Dare! v měřicí ose x.	- 139 -
Obr. 108 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s plnou střechou. Certifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.	- 140 -
Obr. 109 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s plnou střechou. Certifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.	- 141 -
Obr. 110 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa 1, vertikální polarizace.	- 143 -
Obr. 111 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa 1, horizontální polarizace.	- 143 -
Obr. 112 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa x, vertikální polarizace.	- 144 -
Obr. 113 – Frekvenční závislost intenzity elektrického pole v sériovém voze Škoda Octavia s prosklenou střechou. Certifikační měření, osa x, horizontální polarizace.	- 144 -
Obr. 114 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E4.	- 148 -
Obr. 115 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E7.	- 149 -
Obr. 116 – FSV certifikačního a předcertifikačního měření na sériovém voze v bodě E12.	- 150 -
Obr. 117 – FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E4.	- 153 -
Obr. 118 – FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E7.	- 154 -
Obr. 119 – FSV numerických simulací a předcertifikačního měření na vystrojené karoserii v bodě E12.	- 155 -
Obr. 120 – FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E4.	- 158 -
Obr. 121 – FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E7.	- 159 -
Obr. 122 – FSV numerických simulací a certifikačního měření na sériovém voze v bodě E12.	- 160 -

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Rozdělení využití numerických metod FD a TD, převzato z [40]	- 13 -
Tabulka 2 – interpretační měřítko FSV	- 23 -
Tabulka 3 - Rezonanční frekvence vypočtené pro vidy TM (maximální vidové číslo 3).....	- 35 -
Tabulka 4 - Rezonanční frekvence vypočtené pro vidy TE (maximální vidové číslo 3).....	- 35 -
Tabulka 5 – srovnání nároků na výpočet pro modely s různou velikostí elementu sítě (pracovní stanice vybavena 2x procesorem Intel Xeon 2.9 GHz a 12 GB RAM)	- 62 -
Tabulka 6 – Vyjádření měřítka FSV (doplněna pro přehlednost o třídu výsledku).....	- 146 -
Tabulka 7 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x vystrojená karoserie.....	- 147 -
Tabulka 8 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x vystrojená karoserie.....	- 151 -
Tabulka 9 – Přehled hodnocení FSV v měřených bodech – simulace x certifikační měření.....	- 156 -

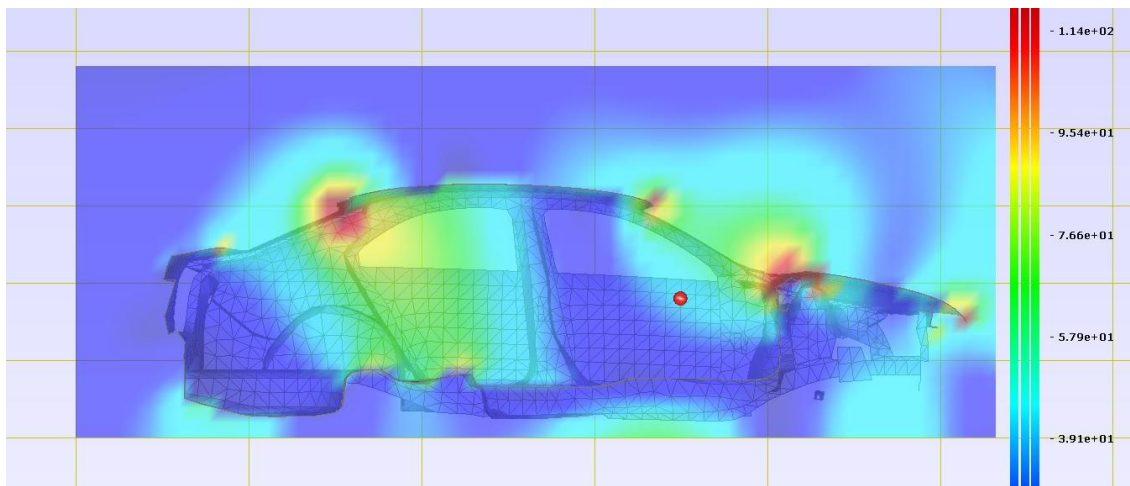
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Vliv využití komponent vnitřního vybavení vozu na rozložení intenzity elektrického pole uvnitř karoserie	- 180 -
--	---------

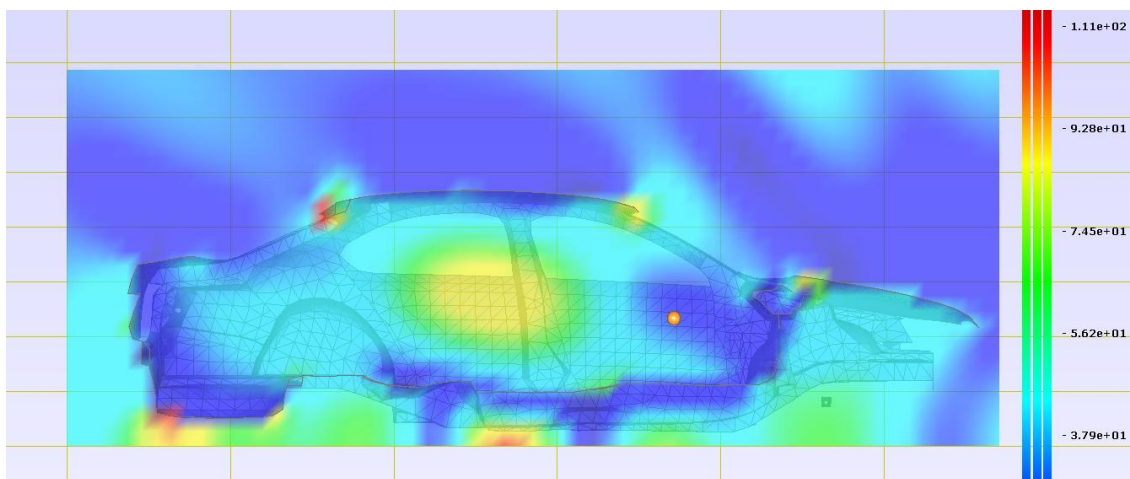
PŘÍLOHY

Příloha 1 – Vliv využití komponent vnitřního vybavení vozu na rozložení intenzity elektrického pole uvnitř karoserie

Holá karoserie vozidla

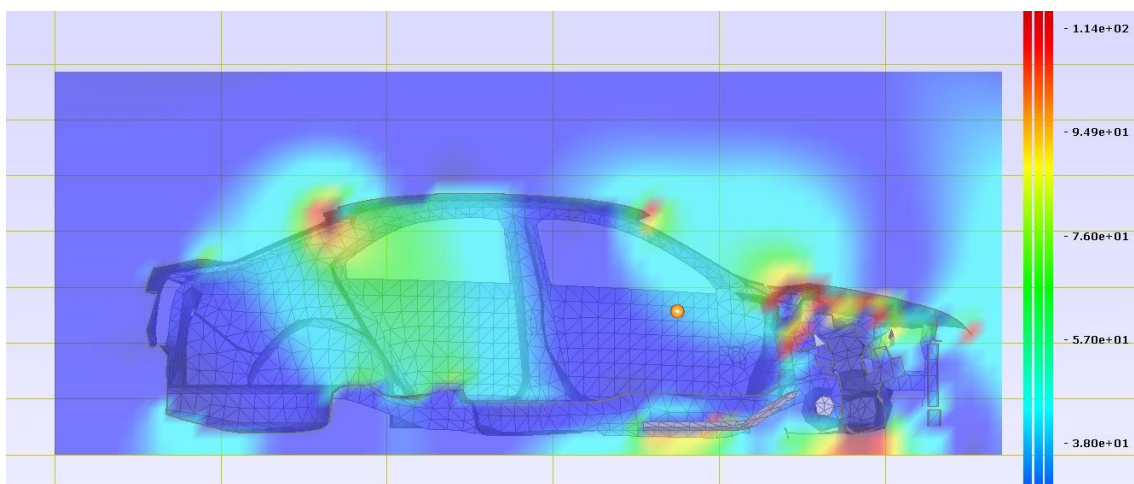


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68 \text{ MHz}$, $E_s = 41 \text{ V/m}$.

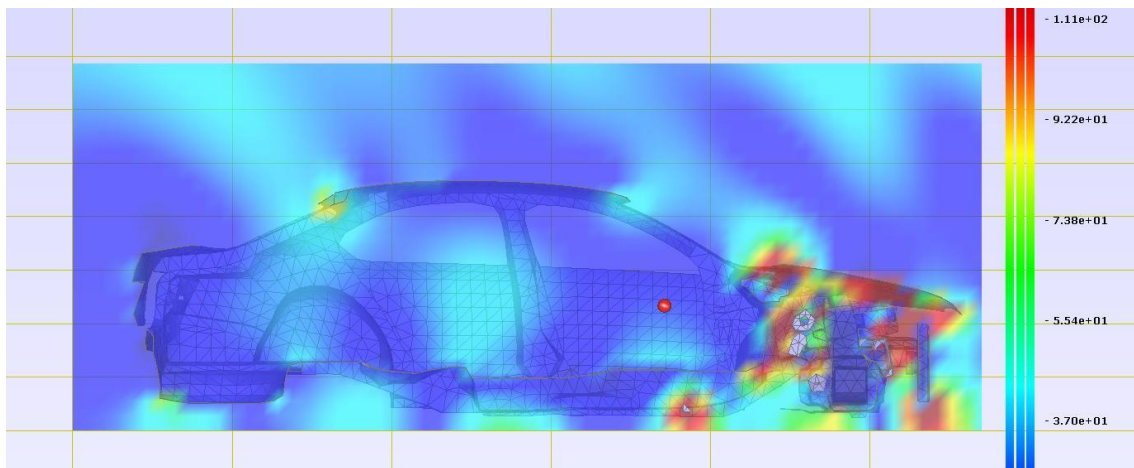


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178 \text{ MHz}$, $E_s = 23,4 \text{ V/m}$.

Zástavba agregátu do karoserie vozidla

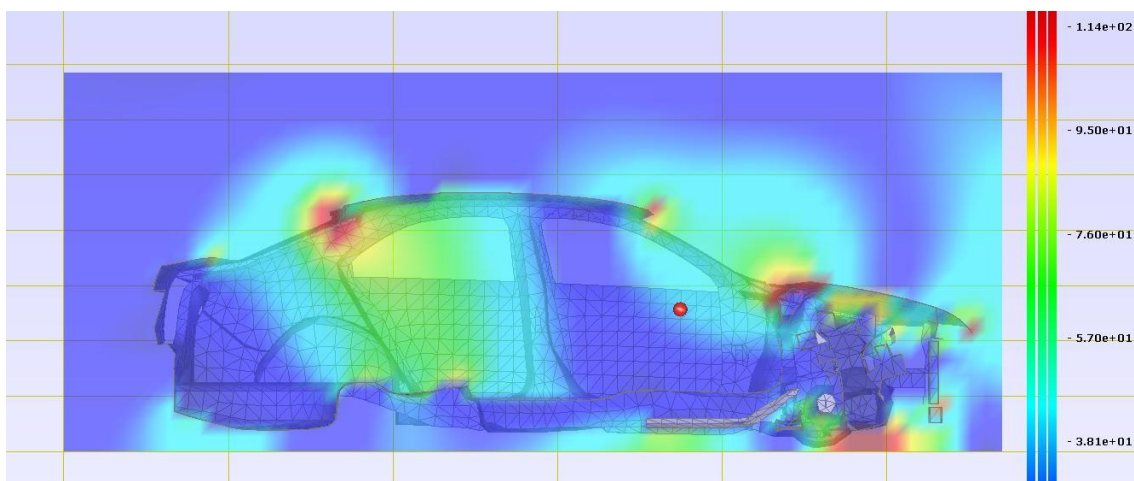


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68$ MHz, $E_s = 33,6$ V/m.

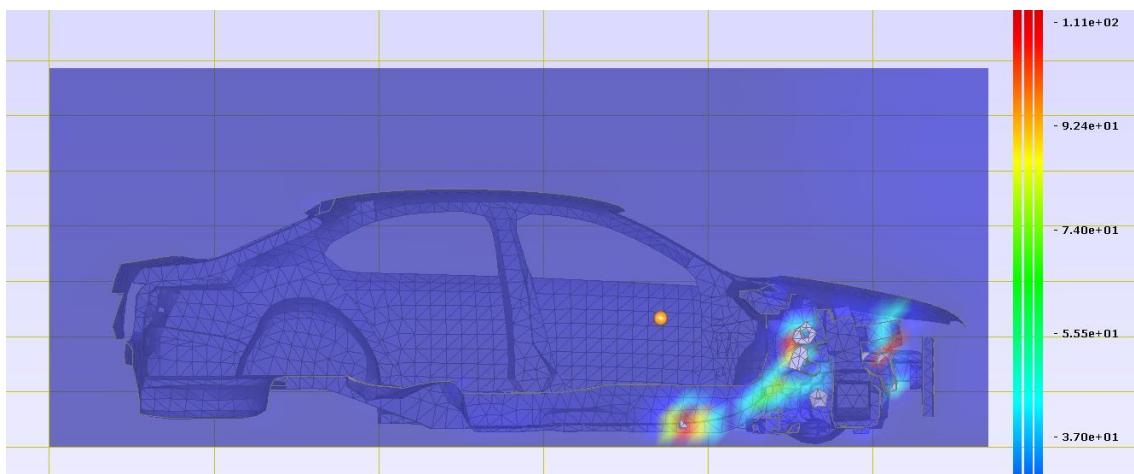


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178$ MHz, $E_s = 23,5$ V/m.

Zástavba přední nápravy a agregátu do karoserie vozidla

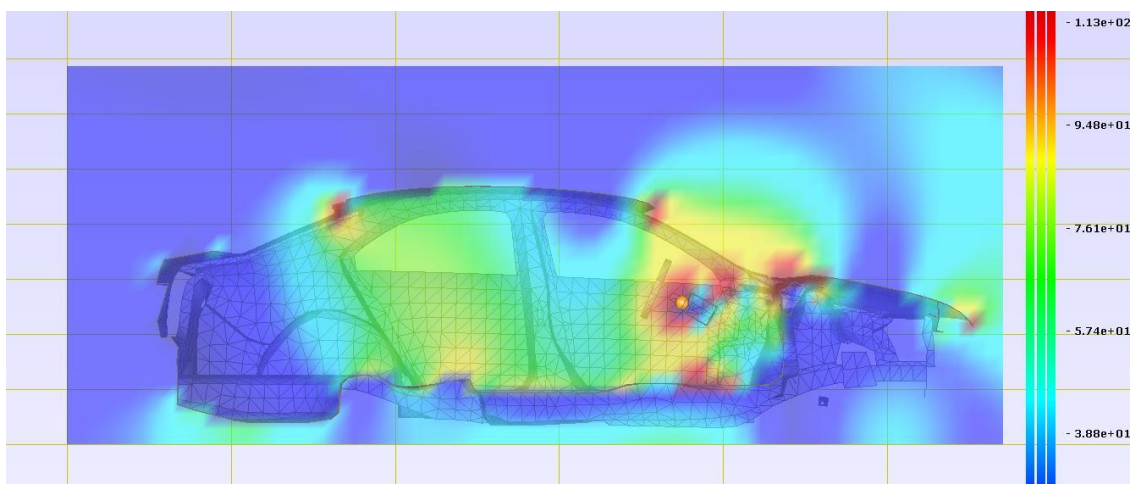


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68 \text{ MHz}$, $E_s = 35,4 \text{ V/m}$.

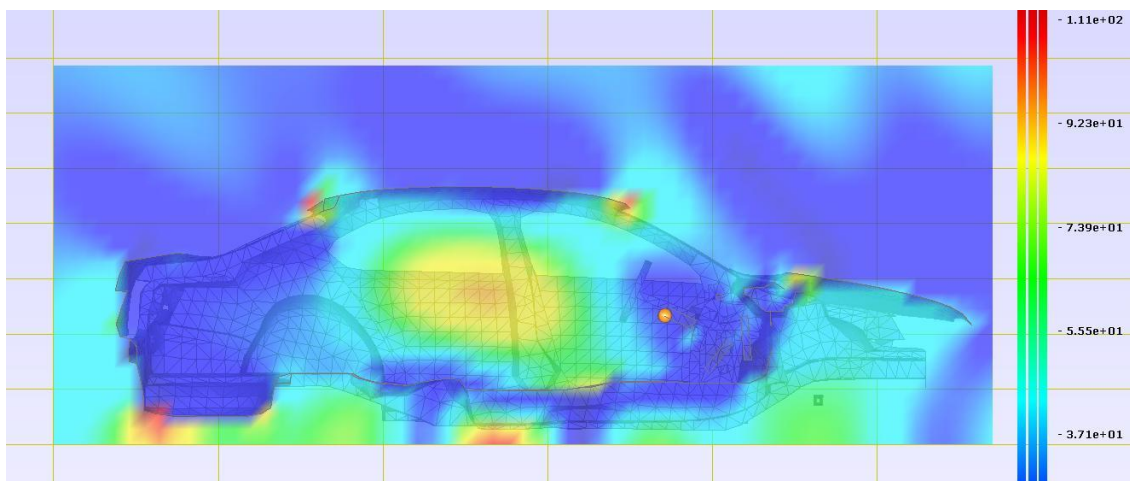


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178 \text{ MHz}$, $E_s = 17,9 \text{ V/m}$.

Zástavba výztuhy palubní desky do karoserie vozidla

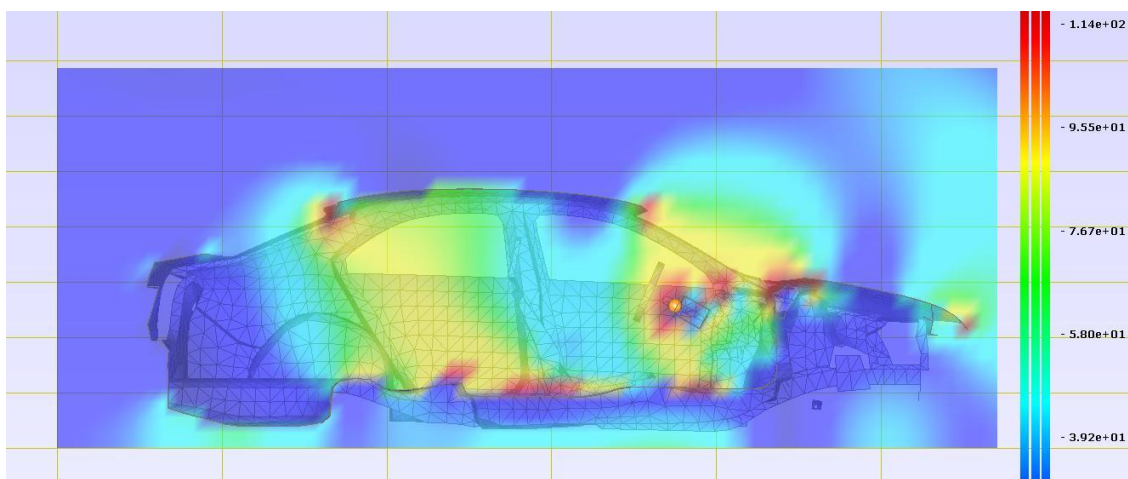


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68 \text{ MHz}$, $E_s = 172,7 \text{ V/m}$.

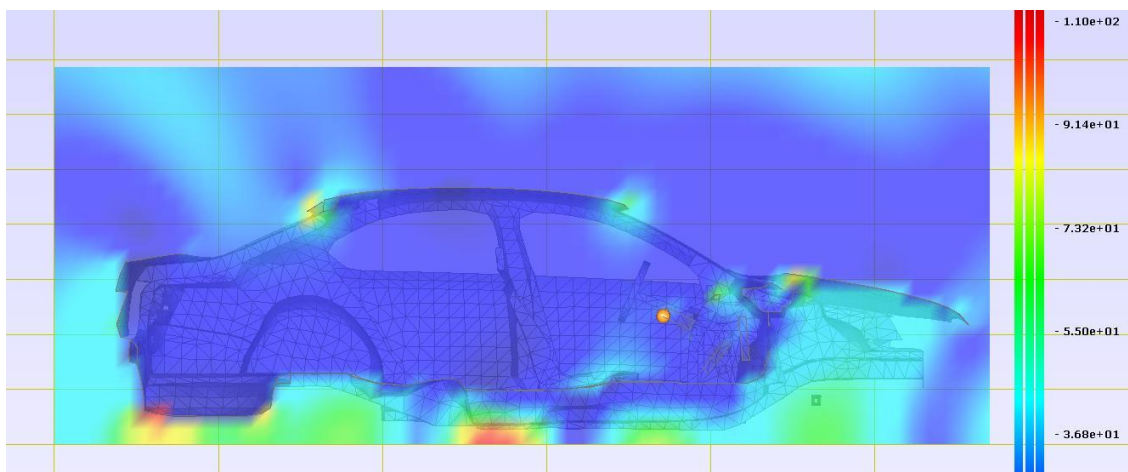


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178 \text{ MHz}$, $E_s = 29,9 \text{ V/m}$.

Zástavba výztuh palubní desky a sedadel do karoserie vozidla

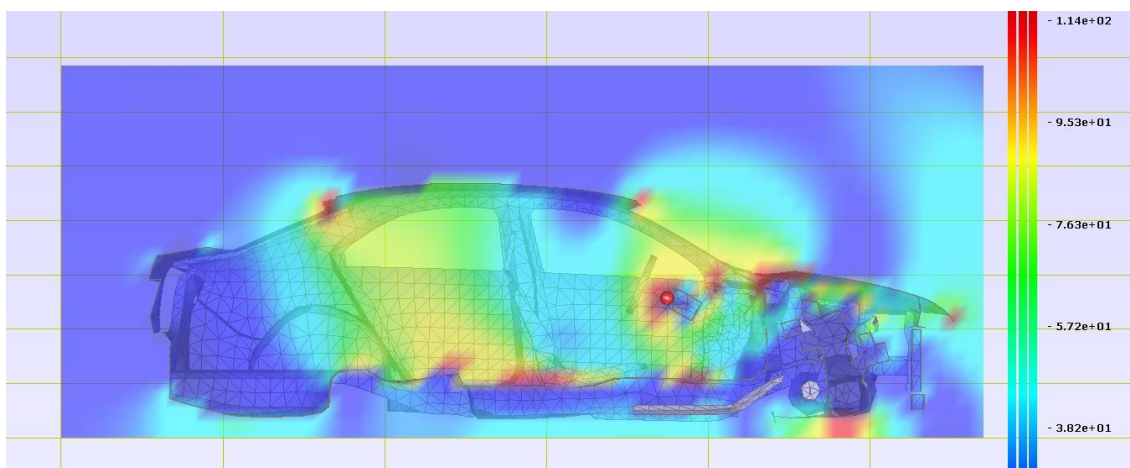


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68 \text{ MHz}$, $E_s = 168,9 \text{ V/m}$.

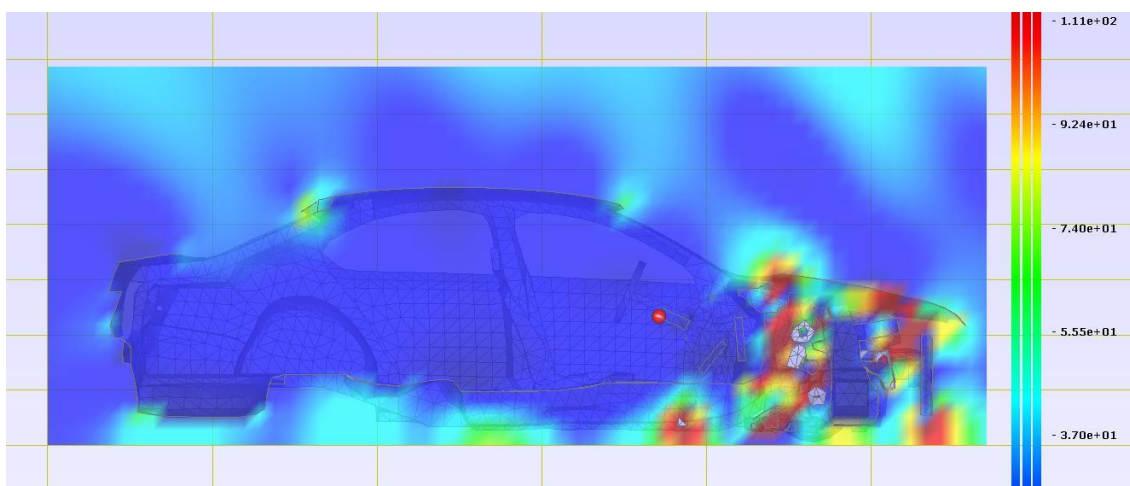


Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178 \text{ MHz}$, $E_s = 30,1 \text{ V/m}$.

Zástavba všech variabilních komponent do karoserie vozidla – kompletní model



Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA RAPID, $f = 68 \text{ MHz}$, $E_s = 151,5 \text{ V/m}$.



Rozložení intenzity elektrického pole v modelu vozu ŠKODA OCTAVIA, $f = 178 \text{ MHz}$, $E_s = 10 \text{ V/m}$.

Curriculum Vitae

Ing. Václav Růžek

Jeronýmová 1668
CZ-390 02 Tábor
Czech Republic

Phone: +420 777 948 322

Email: vaclav.ruzek@skoda-auto.cz

PERSONALITIES

Nationality: *Czech*

Born: *1985, Tábor (Czech Republic)*

EDUCATION

2009 - 2017

Brno University of Technology

PhD study in *Electronics and Communication*

Dissertation thesis: Pre-compliance electromagnetic immunity tests

2007 - 2009

Brno University of Technology

Masters's degree in Electronics and Management

Master's thesis: Dart control sensing unit for steel tip

2004 - 2007

Brno University of Technology

Bachelors's degree in Electronics and Communication

EMPLOYMENT

2008 – 2009

RCV Brno

Tutor

RCV s.r.o., office Brno – tutor of retraining schemes „Basic PC skills“ and „Webdesigner“.

2009 – 2012

Brno University of Technology

Engineer

Teaching: Electromagnetic compatibility, Radioelectronic measurements

Research: Electromagnetic compatibility and their testing, EMC pre-compliance testing, solution of partial development contracts from the EMC point of view.

2012 - present

ŠKODA AUTO a.s.

EMC specialist

Components and whole car testing in EMC point of view. Responsibility of model line Skoda Superb, EMC relevant legislative changes, VW concern standards changes. New EMC testing methods development, focus on electromagnetic field scatter in car body and its influence to the car on-board network.

	STAYS
2010	Aalborg university, Denmark, Department of electronic systems, APNET – international research stay: pre – compliance testing of automotive parts based on Workbench faraday cage testing method, (8-2010 – 12-2010)
2011 - 2012	SKODA AUTO a.s., Czech Republic, Technical research – Car electronic development, pre – compliance testing of prototype cars using numerical methods, (2-2011 – 10-2012)
	AWARDS
2007	FEEC Dean Award (<i>bachelor's thesis</i>)
2009	FEEC Dean Award (<i>master's thesis</i>)
	LANGUAGES
	Czech, English, German - beginner
	TECHNICAL SKILLS
	EMC simulations tools – EMC studio, Matlab
	Measurement skills – experience with R&S, Agilent measuring instruments
	Programming skills – ANSI C, VEE, PHP, HTML
	Electronic design skills - Certificate 50/1976 §6 (into 1000V)
	Soft skills – presentation and tutor experiences
	SUPERVISED THESIS at BUT (2009 – 2011)
since 2011	2 MSc. thesis, 2 Bc. thesis